www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

JAARGANG 22, 1960, no. 5 blz. 149-192 Verschenen 15 september 1960

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELEND TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUKTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

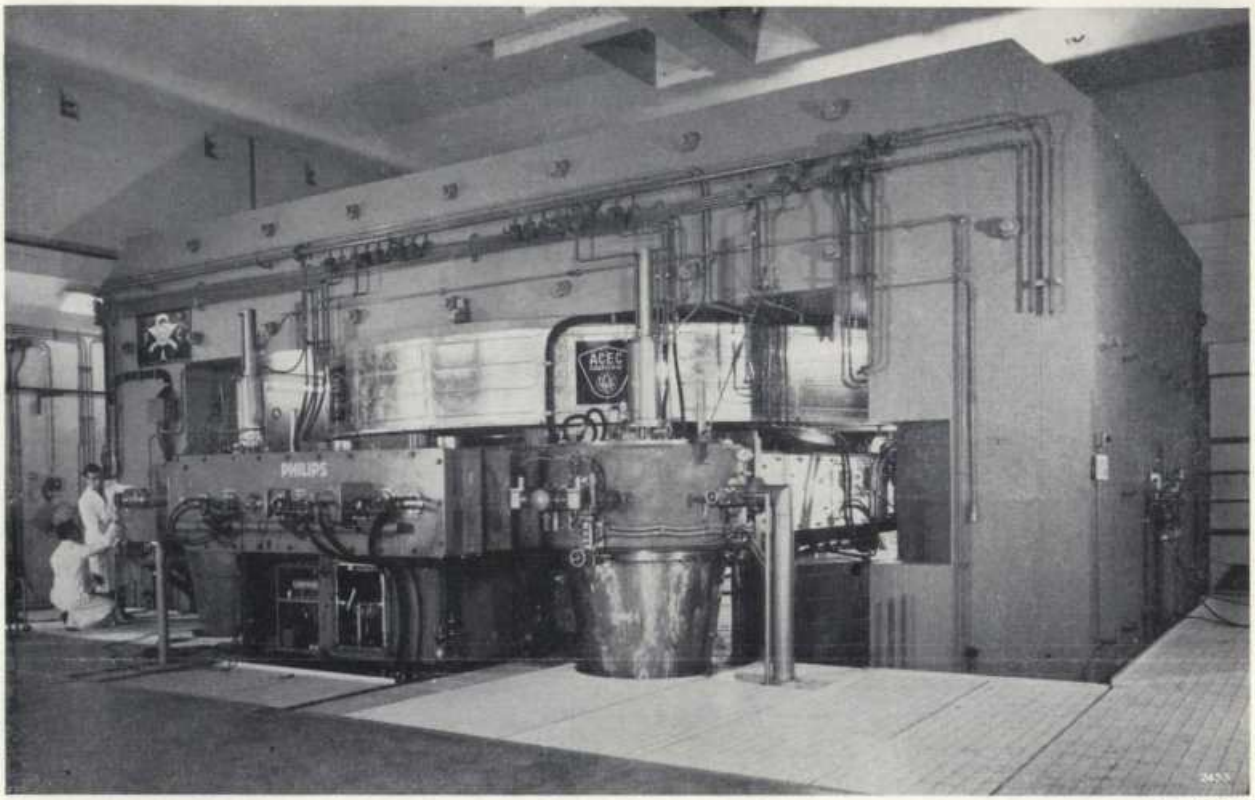


Foto CERN

HET 600-MeV-SYNCHROCYCLOTRON VAN DE CERN TE GENÈVE

I. DOELSTELLING EN ONTWERP.
II. DE HOOGFREQUENTIE-INSTALLATIE.
III. DE STEMVORK-MODULATOR.

Op 1 augustus 1957 werd te Genève het synchrocyclotron van de „Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire" (CERN) voor het eerst met zijn maximale deeltjesenergie in werking gesteld. De machine levert protonen met een energie van 600 miljoen elektronvolt en is daarmee op twee na de grootste van dit soort ter wereld (de grootste staat in Berkeley, Californië, en levert thans protonen van 740 MeV). Tot de constructie van het CERN-cyclotron hebben een reeks Europese fabrieken bijgedragen: de 2500 ton wegende magneet is geleverd door Schneider (Le Creusot, Frankrijk); de bekrachtigingsspoelen voor de magneet door ACEC (België); de vacuümkamer, waarin de deeltjes door het hoogfrequente elektrische veld worden versneld, door Avesta (Zweden); de grote vacuümpompen voor deze kamer door Leybold (Duitsland); enz. Het gehele hoogfrequentiesysteem, met de daarbij behorende modulator, is door Philips te Eindhoven in samenwerking met de CERN ontwikkeld en vervaardigd.

Zoals bekend, kan het principe van het cyclotron in zijn oorspronkelijke vorm, d.w.z. met constante frequentie van de versnellingsspanning, slechts worden toegepast tot relatief lage waarden van de deeltjesenergie (enige tientallen MeV), aangezien de in het magneetveld spiraliserende deeltjes ten gevolge van de relativistische toeneming van hun massa uit de pas raken met de spanning. Grotere energieën kan men bereiken indien men de hoogfrequente spanning in frequentie moduleert: neemt gedurende een deel van de modulatieperiode de frequentie af op een wijze die aangepast is bij de toeneming van de massa, dan kunnen de deeltjes tot aan de rand van het magneetveld in de pas blijven met de spanning. Hierbij worden niet alleen die deeltjes meegenomen

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

*die op één bepaald tijdstip zijn gestart, maar — dank zij de optredende „fazefocussering" — telkens een grote groep van deeltjes (principe van het synchrocyclotron) *).*

Bij de meeste tot dusver geconstrueerde synchrocyclotrons bewerkstelligt men de frequentiemodulatie van de versnellingsspanning met behulp van een roterende condensator. Voor de CERN-machine werd een ander systeem gekozen, met een trillende condensator, uitgevoerd als een soort reusachtige stemvork. In hetgeen volgt, zal de ontwikkeling van dit nieuwe modulatorsysteem worden beschreven. Ter afronding laten wij aan deze beschrijving een artikel voorafgaan dat de algemene opzet en de belangrijkste ontwerpgegevens van het synchrocyclotron behandelt, en een artikel dat in het kort het complete hoogfrequentiesysteem beschrijft.

De gehele installatie is gebouwd onder leiding van prof. W. Gentner, nadat de plannen in hoofdzaak waren gemaakt onder leiding van prof. C. J. Bakker, de latere directeur-generaal van de CERN, die helaas onlangs door een ongeval om het leven gekomen is. Prof. Bakker heeft op vriendelijke wijze medewerking verleend voor het tot stand komen van deze reeks artikelen. Aan prof. Gentner betuigen wij onze dank voor het schrijven van het inleidende artikel.

I. DOELSTELLING EN ONTWERP

door W. GENTNER **).

621.384.611.2

Historie

Serieuze gesprekken over de oprichting van een Europees laboratorium voor de fysica van energierijke deeltjes begon men te voeren in het jaar 1951. Reeds op de eerste bijeenkomst van de voorlopige „Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire" (CERN) werd men het eens over de algemene doelstellingen, zoals die later werden vastgelegd in de statuten van de „Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire", die in 1954 haar beslag kreeg. Het laboratorium moest worden uitgerust met twee grote versnellers, zoals toentertijd in Europa nog niet bestonden. Voor de ene machine werd gedacht aan een groot synchrocyclotron, waarvan de constructie gebaseerd zou worden op het voorbeeld van reeds beproefde installaties van hetzelfde type en vergelijkbare energie. Met de tweede machine moest pionierswerk worden geleverd, zowel wat betreft de deeltjesenergie (boven de 10 miljard elektronvolt) als wat betreft de constructie [1]).

Grondslagen voor het ontwerp

De eerste, kleinere machine — later gewoonlijk als SC-machine aangeduid —, zal hier kort worden beschreven. De bedoeling die bij deze machine voorzat, was vooral dat het CERN-laboratorium zo spoedig mogelijk zou beschikken over een sterke bron van π- en μ-mesonen, om op het gebied van het mesonen-onderzoek op internationaal niveau in de voorste gelederen mee te kunnen doen. Hiertoe was het noodzakelijk de energie van de versneller aanzienlijk groter te kiezen dan de drempelwaarde voor de mesonenproduktie, die bij gebruik van protonen ongeveer 180 MeV bedraagt. Men wist toen nl. reeds dat de opbrengst van π-mesonen aanvankelijk niet erg steil met de energie toeneemt (*fig. 1*). Bovendien was het van belang dat de geproduceerde mesonen een zo breed mogelijk energiespectrum zouden krijgen, b.v. voor experimenten over de verstrooiing van mesonen in materie als functie van hun snelheid. Naar boven toe werd de keuze van de energie begrensd door de snel toenemende kosten van de

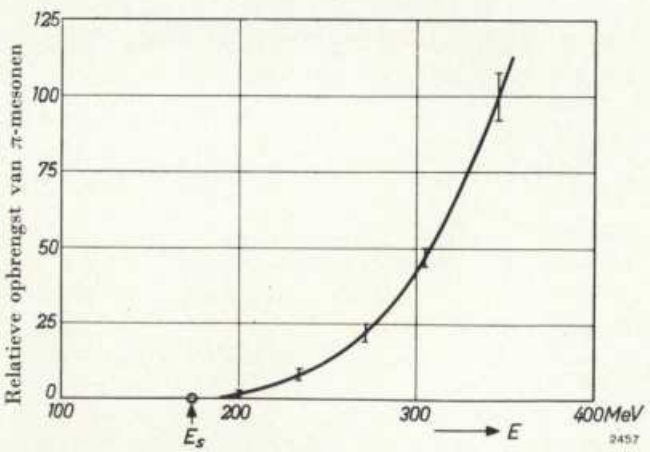


Fig. 1. Produktie van π-mesonen bij het beschieten van een trefplaat van grafiet (dikte $\frac{3}{4}$ mm) met protonen. Uitgezet is de relatieve opbrengst van π-mesonen als functie van de protonenenergie E. E_s is de drempelenergie. De opbrengst bij 345 MeV (de hoogste bij deze metingen bereikte energiewaarde) is gelijk 100 gesteld. Alleen mesonen met een energie tussen 2 en 10 MeV werden gemeten (Stanley B. Jones en R. Stephen White, Phys. Rev. **78**, 2, 1950).

*) Voor een nadere uiteenzetting van dit principe, zie b.v. W. de Groot, Cyclotron en synchrocyclotron, Philips techn. T. **12**, 65-72, 1950. Vele principiële constructieproblemen van een synchrocyclotron zijn behandeld in de artikelenreeks: F. A. Heyn, Het synchrocyclotron te Amsterdam, I. Algemeen overzicht van de installatie, II. De oscillator en de modulator, III. De elektromagneet, IV. (met J. J. Burgerjon) Details van de constructie en hulpapparaten, Philips techn. T. **12**, 245-251, 251-260, 353-368, 1950, en **14**, 291-307, 1952.

**) Directeur van het Max Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg. Van 1955 tot 1959 directeur van de Synchrocyclotron-afdeling van de CERN, Genève.

[1]) Kort geleden is ook deze versneller gereed gekomen: hij werd op 5 februari 1960 officieel in werking gesteld. De bereikte protonenenergie bedraagt 28,5 miljard elektronvolt.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

machine, alsook door zuiver technische gezichtspunten. Immers, voor het synchrocyclotron is, evenals voor het klassieke cyclotron, een constant magneetveld nodig, waarin de cirkelvormige versnellingskamer wordt geplaatst. De poolplaten van de magneet nu wilde men zo groot kiezen dat ze met de grootste in Europa aanwezige draaibanken nog konden worden vervaardigd. Bovendien moesten deze platen, evenals de bekrachtigingsspoelen, per vrachtauto getransporteerd kunnen worden. Deze verschillende voorwaarden van fysische, technische en financiële aard leidden ten slotte tot een pooldiameter van ongeveer 5 meter (vgl. *fig. 2*). Hierbij is, als men voor een geschikt verloop van de magnetische inductie zorgt, een maximale baanstraal van 2,27 m mogelijk, hetgeen voor protonen, bij een inductie op de as van 1,9 Wb/m² (19 000 gauss), aan een energie van omtrent 600 MeV beantwoordt. Deze energie werd voor het π- en μ-mesonenonderzoek als voldoende beschouwd, speciaal indien het mocht gelukken sterke bundels van deeltjes te produceren, wat een verder oogmerk van de constructie was. Voorts lag het in de bedoeling niet alleen op trefplaten binnen het cyclotron mesonen te produceren, maar ook een zo groot mogelijke fractie van de inwendige deeltjesstroom naar buiten te brengen, zodat ook mesonen op uitwendige trefplaten kunnen worden opgewekt.

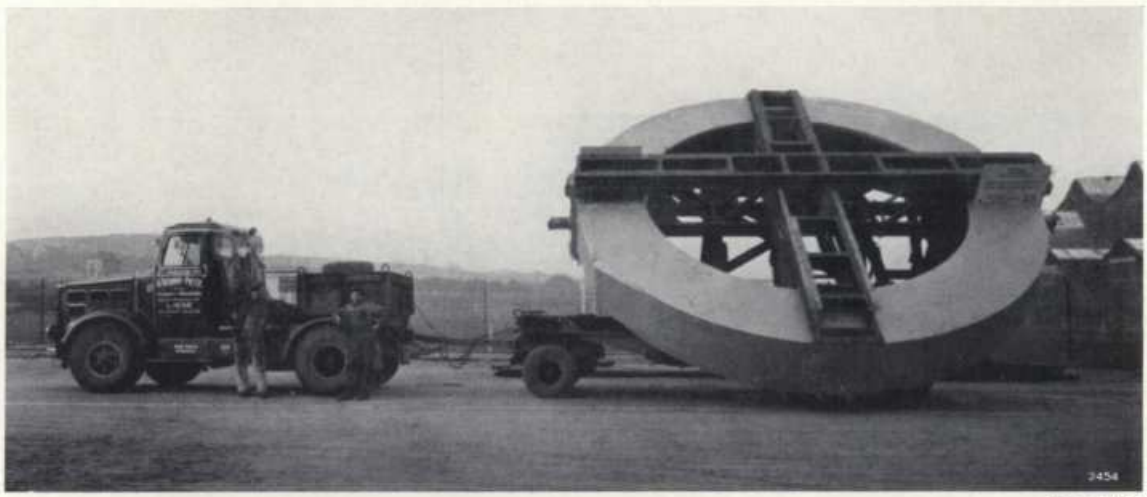


Foto CERN

Fig. 2. Een van de beide bekrachtigingsspoelen (vervaardigd door ACEC, België) bij het transport per vrachtauto naar Genève. De diameter van het gat (d.i. de pooldiameter van de magneet) bedraagt ongeveer 5 meter.

Het ontwerp van de installatie werd opgesteld door een groep ingenieurs en fysici, die voor het merendeel uit kernfysische laboratoria van de 12 ledenstaten afkomstig waren [2]). Een hele reeks deskundigen en constructeurs op het gebied van versnellers verleenden in de eerste jaren als adviseurs hun medewerking aan de vaste groep, die gestadig werd uitgebreid. Vervolgens werd de inschrijving voor de vervaardiging van de onderdelen van het cyclotron en al zijn hulpinstallaties op de Europese markt geopend, en de opdrachten werden geplaatst bij de fabrieken met de gunstigste aanbiedingen. Het gehele project is op deze wijze een sprekend voorbeeld geweest van de Europese samenwerking, zoals die in de opzet van de CERN wordt nagestreefd.

De bouw van de installatie in grote trekken

De opstelling van het synchrocyclotron en de ligging van de experimenteerhallen en van de kanalen voor de bundels ziet men in *fig. 3*. Het cyclotron is centraal in het hiervoor bestemde gebouw geplaatst en ter bescherming van de omgeving tegen straling omgeven door wanden van bariumbeton ter dikte van 6 m (het bariumgehalte vergroot de absorberende werking). Diametraal tegenover elkaar, links en rechts in de figuur, bevinden zich de twee hallen voor experimenten: links, in P, heeft men protonen ter beschikking, rechts, in N, neutronen en mesonen, die binnen het cyclotron zijn geproduceerd. De beschermingswanden die deze hallen van het cyclotron scheiden, zijn uit beweegbare blokken opgebouwd, en men kan ze in hun geheel in de vloer laten verdwijnen. Hierdoor wordt het maken en justeren van nieuwe opstellingen in hoge mate vergemakkelijkt. Is er in een der hallen een bestraling aan de gang, dan kunnen onafhankelijk hiervan in de andere hal experimenten worden voorbereid. De hal N met zijn wand B_2 is zo dicht mogelijk bij het cyclotron

[2]) Leden-staten van de CERN zijn: België, Denemarken, Duitse Bondsrepubliek, Frankrijk, Griekenland, Groot-Brittannië, Italië, Joegoslavië, Nederland, Noorwegen, Zweden, Zwitserland. Sedert 1959 is ook Oostenrijk lid.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

gebracht, daar de mesonen een zo korte levensduur hebben dat ze op weg naar de experimenteerhal reeds grotendeels ontleden.

Op ca. 30 m afstand zijn hoge aarden wallen aangebracht die de overige gedeelten van de SC-afdeling nog eens extra tegen straling beschermen. Eventuele te sterke straling in bepaalde andere richtingen van bestuurd, aangezien er zich in het algemeen niemand in het cyclotrongebouw moet bevinden wanneer in beide experimenteerhallen bestralingen aan de gang zijn.

Dat het cyclotron op de begane grond is opgesteld — en niet, zoals bij vele soortgelijke installaties, in een onderaardse ruimte —, heeft het grote voor-

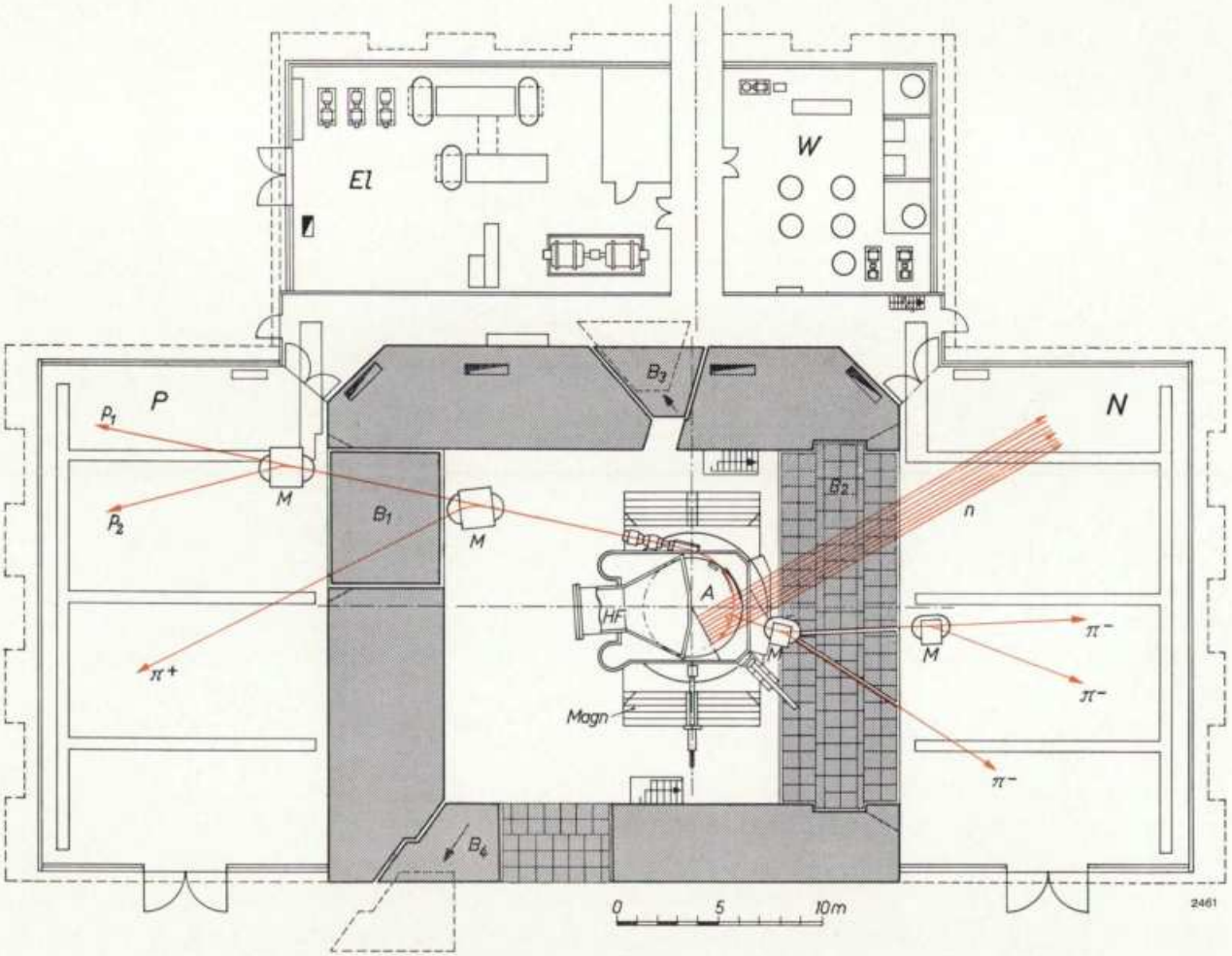


Fig. 3. Opstelling van het synchrocyclotron van de CERN, met betonnen beschermingswanden (grijze tint), kanalen voor de bundels en experimenteerhallen (*P* voor protonen, *N* voor neutronen). Alle bundels van deeltjes zijn rood getekend: p_1 protonenbundel, p_2 afgebogen protonenbundel, *n* reeks neutronenbundels, opgewekt bij verschillende stralen van de protonenbaan in de versnellingskamer, π^+ en π^- bundels van resp. positieve en negatieve π-mesonen, op geschikte wijze afgebogen en gefocusseerd door magneten *M*. *A* versnellingskamer. *Magn* cyclotronmagneet. *HF* hoogfrequentiesysteem. B_1 en B_2 hydraulisch op en neer beweegbare, uit losse blokken beton opgebouwde beschermingswanden. B_3 en B_4 door elektromotoren verplaatsbare blokken beton die als deuren fungeren. *El* hal met generatoren voor de bekrachtigingsstroom en andere elektrische hulpapparatuur. *W* hal voor de koelwaterpompen en het koelcircuit voor het water.

de omgeving wordt geabsorbeerd door betonnen blokken die men op geschikte plaatsen opstapelt (*fig. 4*). Een 60 m lange gang leidt van het cyclotron en de experimenteerhallen naar de bedieningszaal (*fig. 5*) en de „telkamers", waar de apparaturen voor het tellen van de deeltjes bij de experimenten worden opgesteld (de meeste experimenten komen immers op dergelijke tellingen neer). Van daaruit worden het cyclotron en de experimenten

deel dat de buitenwanden van de experimenteerhallen dun konden worden gehouden. Dientengevolge wordt de bij de experimenten gebruikte straling slechts in geringe mate door de wanden teruggestrooid. Deze „inwendige bescherming tegen straling", die niets afdoet aan de doeltreffende uitwendige bescherming, is bij het werken met het cyclotron van zeer grote waarde gebleken. Vrijwel geen enkele vergelijkbare installatie heeft in de

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

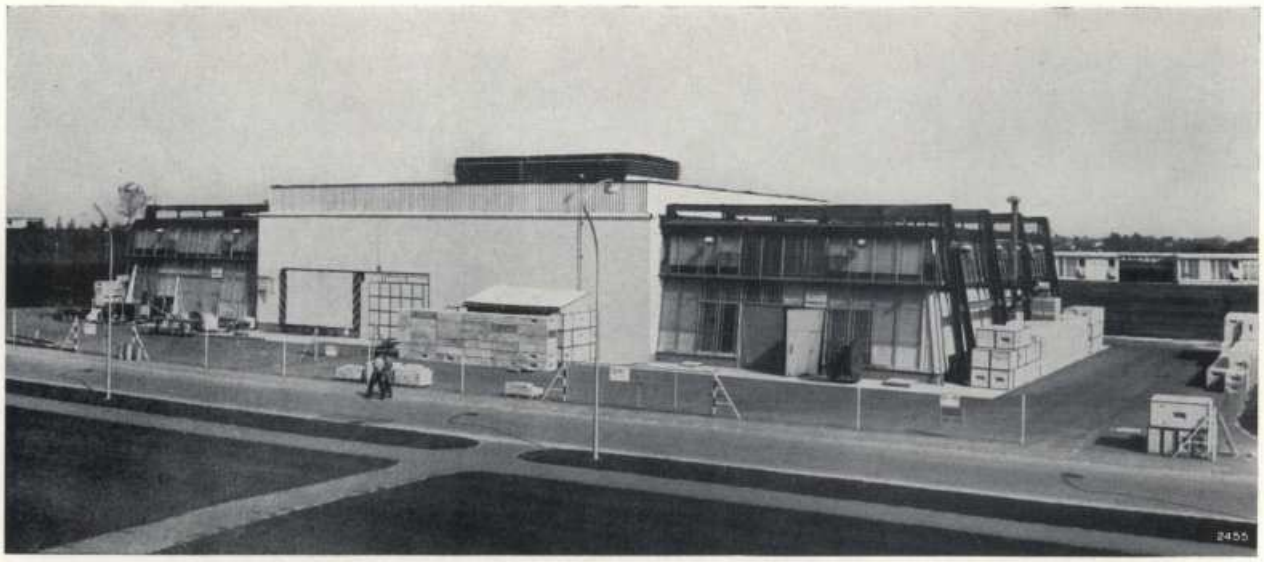


Foto CERN

Fig. 4. Het gebouw waarin het synchrocyclotron is ondergebracht. De experimenteerhallen, die men rechts en links ziet en waarin tijdens de werking van het cyclotron allerlei, op afstand bediende, apparaten aan de beschieting door deeltjes worden blootgesteld, zijn slechts door dunne wanden afgesloten, ten einde de terugstrooiing van deeltjes te beperken. De richtingen waarin eventueel straling naar het omringende terrein zou kunnen doordringen, zijn op enige afstand door blokken beton versperd.

experimenteerhallen een dusdanig geringe achtergrond van algemene verstrooide straling als die van de CERN. Voor vele experimenten is juist dit feit van doorslaggevend belang. De dunne wanden bieden ook het voordeel dat een stralenkanaal gemakkelijk naar buiten kan worden verlengd, indien de experimenten dit nodig maken.

Onderdelen van de constructie

De constructie van de magneet werd eerst bestudeerd aan een model op schaal 1 : 10. (Dit model wordt thans gebruikt in een klein cyclotron voor het nadere onderzoek van het versnellingsproces.) De magneet bestaat uit 54 blokken, de meeste met een gewicht van 46 ton. Het totale gewicht van 2500

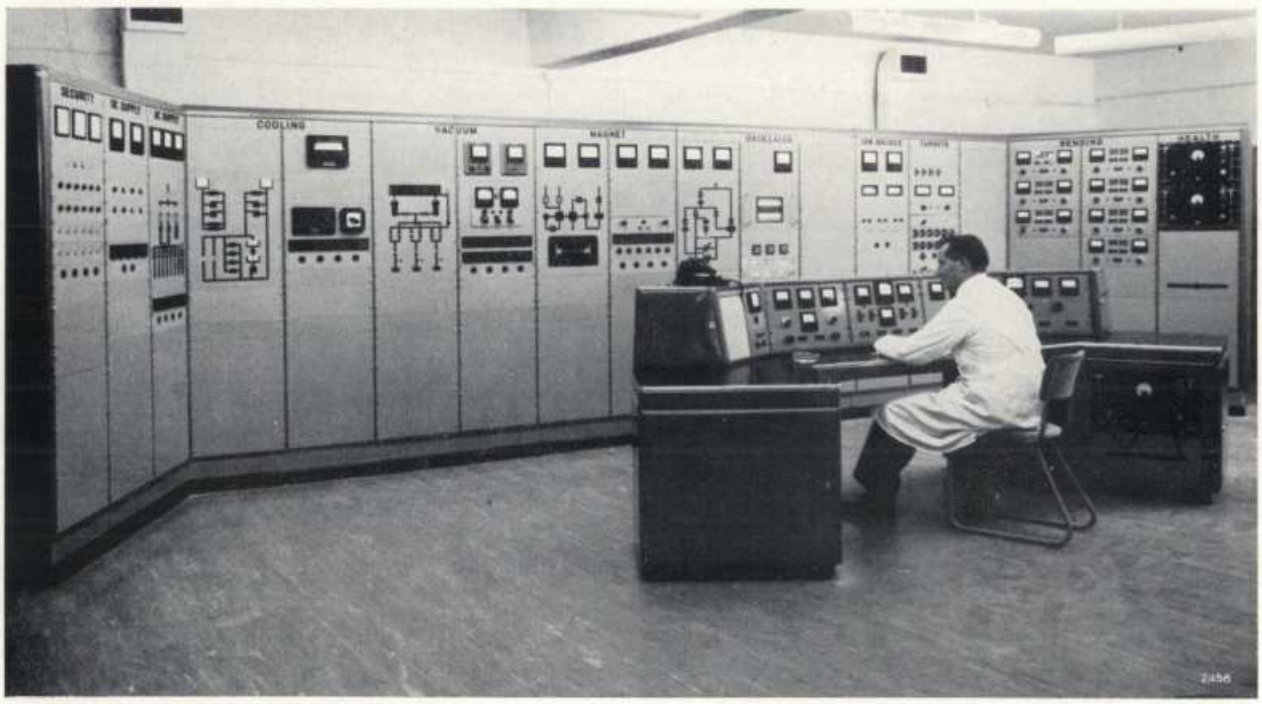


Foto CERN

Fig. 5. De bedieningszaal met alle regel- en controle-inrichtingen van het synchrocyclotron.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

ton vereiste een zeer betrouwbare fundering. De poolafstand ligt tussen 45 en 35 cm. De twee bekrachtigingsspoelen zijn gewikkeld van aluminiumbuis met vierkante doorsnede, waardoor koelwater stroomt. De spoelen worden gewoonlijk gevoed met 1750 A, waarbij op de as de reeds genoemde inductie van 1,9 Wb/m² wordt verkregen. *Fig. 6* geeft het verloop van de inductie in het vlak midden tussen de poolplaten, als functie van de straal.

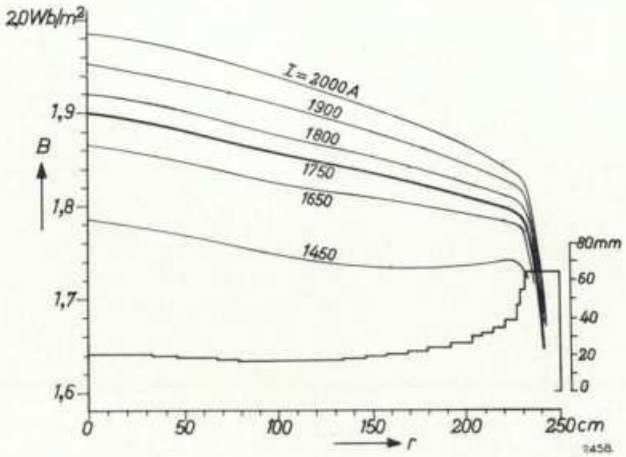


Fig. 6. Inductie B in het vlak midden tussen de polen van de magneet, als functie van de straal r, bij verschillende stromen I in de bekrachtigingsspoelen. Het verloop van de inductie wordt bij een synchrocyclotron door middel van ringvormige, stapsgewijze naar de rand toenemende verdikkingen („shimming") zodanig geregeld dat de stabilisatie van de baan der cirkelende deeltjes tot aan de rand gehandhaafd wordt. Het kritieke punt waar de stabilisatie faalt (d.i. waar de gradiënt $n = (dB/dr)\,(r/B)$ de waarde 0,2 bereikt), ligt hier bij de straal $r = 2{,}27$ meter.
Het profiel van de poolplaten met de „shim"-ringen is onderaan getekend; zie de schaal aan de rechterkant.

Bij een bekrachtigingsstroom van 1750 A bedraagt het vermogen dat in de spoelen in warmte wordt omgezet, ongeveer 750 kW. Het koelwater dat deze warmte afvoert, wordt zelf gekoeld en vormt een gesloten kringloop. Op de titelfoto ziet men het bovenste gedeelte van de magneet met de bovenste bekrachtigingsspoel en de versnellingskamer.

Het vacuüm van de versnellingskamer, dat van de orde van grootte 10^{-6} mm Hg moet zijn, wordt gewaarborgd door twee oliediffusiepompen, ieder met een pompsnelheid van 12 m³/sec bij 10^{-4} mm Hg. De gehele versnellingskamer inclusief de aansluitstukken voor de pompen is vervaardigd uit platen van niet-roestend staal, die aan een raamconstructie zijn gelast. Moeilijkheden met het vacuüm hebben zich nimmer voorgedaan.

Als bron van de protonen was oorspronkelijk aan een ionenbron met boog en gloeikatode gedacht. Deze is later vervangen door een ionenbron volgens Penning, met koude katode, die veel eenvoudiger is en die men ook zonder moeilijkheden impulsgewijze kan laten werken.

Het hoogfrequentiesysteem, waarvan de betrouwbaarheid de werking van het gehele cyclotron bepaalt, wordt in de volgende artikelen van deze reeks nader beschreven. Het principe van de stemvork, dat voor de variabele capaciteit van de modulator werd gekozen en waarmee een frequentievariatie tussen 29 en 16,5 MHz wordt teweeggebracht, heeft na moeilijk ontwikkelingswerk ten slotte zijn deugdelijkheid bewezen. Het versnellen van de protonen in het hoogfrequente veld geschiedt op de beproefde wijze met een enkele Dee, waardoor één helft van de versnellingskamer geheel vrij blijft voor de plaatsing van trefplaten. De globale constructie van de Dee en verdere bijzonderheden van de versnellingskamer zijn in *fig. 7* te zien.

De machine is voorzien van de volgende trefplaatsystemen. In de eerste plaats kunnen voor het produceren van neutronen met verschillende energie acht plaatjes op verschillende afstand van het midden overeind gezet worden („flip-targets"). Een beweegbare sonde („probe-target") kan eveneens op verschillende afstand van het midden geplaatst worden, de toepassing hiervan komt hieronder ter sprake. Voorts is een langs de buitenste cirkelbaan van de protonen verrijdbare trefplaat aanwezig (zg. universele trefplaat, of „Fermi-trolley"), die dient voor de produktie van mesonen. Aldus kan de mesonenbron gemakkelijk ten opzichte van het afbuigsysteem voor de mesonenkanalen worden gejusteerd.

Het afbuigen van de protonenbundel geschiedt in een magnetisch kanaal met een regelbare magnetische storing, die geschikte oscillaties van de bundel opwekt. Deze, door Le Couteur ontwikkelde, manier van afbuigen had bij het synchrocyclotron te Liverpool zijn bruikbaarheid bewezen [3]). Onmiddellijk na het uittreden gaat de protonenbundel door twee quadrupoollenzen met een brandpuntsafstand van ongeveer 3 m. Hierop volgt, kort vóór de beschermingswand, een dubbel focusserende afbuigmagneet, die de bundel precies door het kanaal naar de experimenteerhal stuurt.

In *tabel I* zijn de belangrijkste gegevens over de werking van het cyclotron verzameld.

[3]) K. J. Le Couteur, The extraction of the beam from the Liverpool synchrocyclotron, I. Theoretical, Proc. Roy. Soc. **A 232**, 236-241, 1955. — Bij de afleiding van het vereiste magnetische kanaal heeft N. F. Verster van het Philipslaboratorium te Eindhoven meegewerkt, daarbij gebruik makend van de daar aanwezige elektronische rekenmachine.
Noot van de redactie: Deze afleiding, die ook met succes is toegepast voor het door Philips gebouwde synchrocyclotron te Orsay bij Parijs, zal te zijner tijd in een artikel in dit tijdschrift behandeld worden.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Tabel I. Belangrijkste gegevens van het CERN-synchrocyclotron.

maximale energie van de protonen	600 MeV
grootste straal R van de protonenbaan	2,27 m
magnetische inductie bij $R=0$, midden tussen de polen	1,88 Wb/m²
magnetische inductie bij $R = 2{,}27$ m	1,79 Wb/m²
ampèrewindingen, normaal	$1{,}2\times10^6$
ampèrewindingen, maximaal toelaatbaar	$1{,}35\times10^6$
vermogen voor de bekrachtiging, normaal	750 kW
gewicht van de magneet	2500 ton
frequentiezwaai van de versnellingsspanning	29 - 16,5 MHz
herhalingsfrequentie van de modulatie	55 Hz

De opbrengst aan snelle protonen en mesonen

De stroomsterkte van de inwendige protonenbundel kan worden gemeten met een thermo-element dat men bevestigt op de beweegbare sonde. Met toenemende straal en dienovereenkomstig toenemende deeltjesenergie gaat echter de bundel het thermo-element meer dan eens doorlopen. Tevens daalt het energieverlies van de deeltjes per cm weglengte. Dientengevolge hangt bij stralen boven 1,5 m de evenredigheidsfactor die het verband tussen

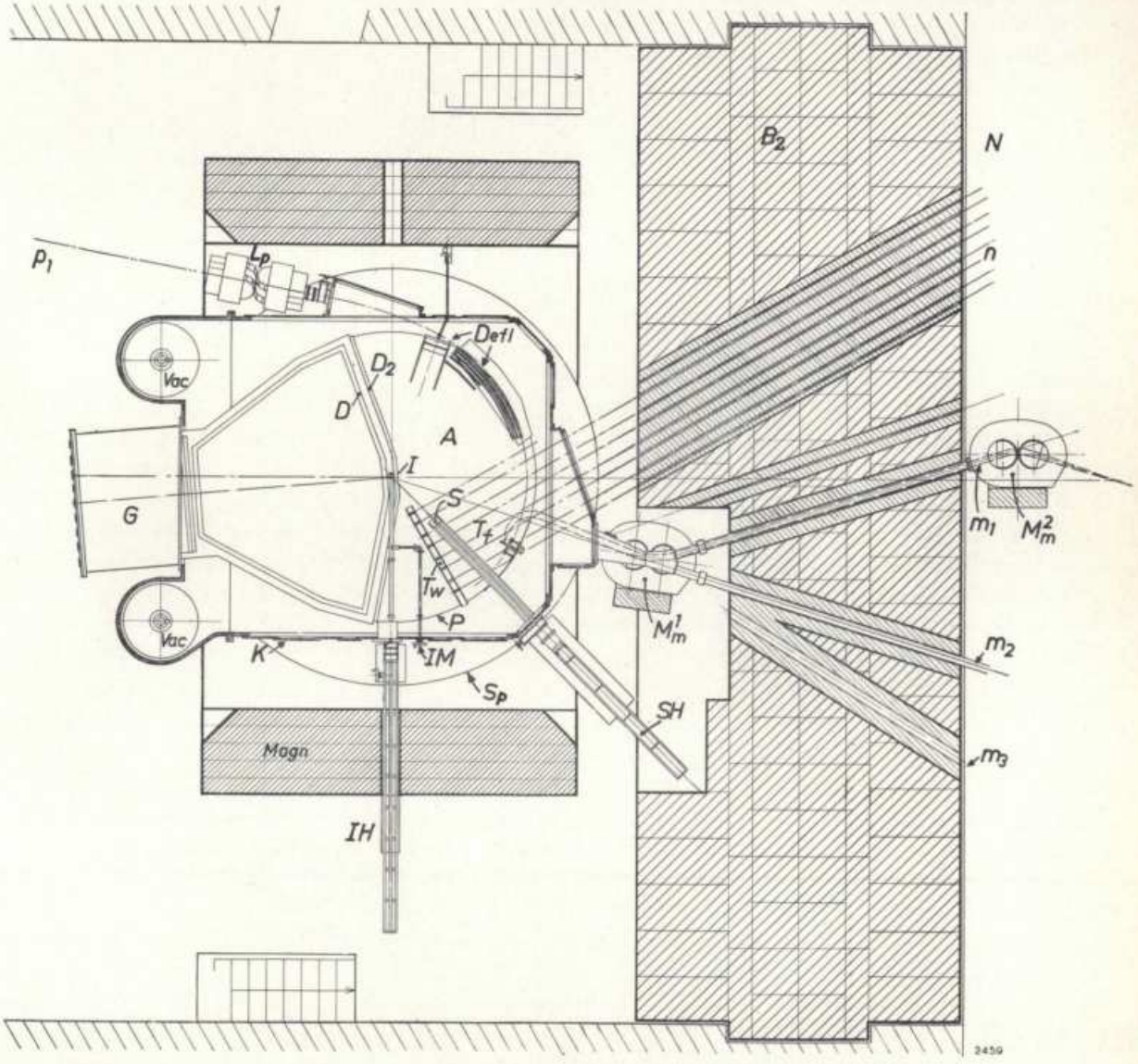


Fig. 7. De versnellingsruimte A in de kamer K, met kanalen door de beschermingswand B_2 van de neutronen-experimenteerhal N. Het hoogfrequentiesysteem bevat slechts één Dee-elektrode (D): de tweede is geaard en kan derhalve als een eenvoudige strip (D_2) worden uitgevoerd, zodat de rechter kamerhelft geheel vrij is voor trefplaten. I ionenbron aan arm IH en met instelmechaniek IM. T_w zg. flip-targets, d.z. trefplaten die overeind gezet kunnen worden, voor de produktie van neutronen van verschillende energie (bundels n). S sonde aan arm SH, o.a. bestemd voor de meting van de intensiteit van de protonenbundel op verschillende afstand van het midden. *Defl* magnetisch kanaal met hulpinrichtingen om de protonen buiten de versnellingskamer te brengen. L_p sterk focusserende lens voor de naar buiten gebrachte protonenbundel p_1. T_f langs de buitenste protonenbaan verschuifbare universele trefplaat voor de produktie van mesonen; in de getekende stand worden negatieve π-mesonen door de afbuigmagneten $M_m{}^1$ en $M_m{}^2$ naar buiten gebracht. m_1, m_2, m_3 zijn de mesonenbundels. *Magn* juk van de grote cyclotronmagneet. P magneetpool. Sp bekrachtigingsspoel. *Vac* pompen. G hoogfrequentiebron en stemvork-modulator.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

de thermo-e.m.k. en de bundelstroomsterkte vastlegt, van de straal af. Voor een absolute meting is derhalve deze methode alleen te gebruiken met zekere correcties, die niet zo heel eenvoudig te schatten zijn. Voor relatieve metingen daarentegen is de methode zeer gemakkelijk. Aldus kon worden vastgesteld dat tijdens de versnelling geen aanzienlijk verlies van deeltjes optreedt. Ook werd deze methode, en wel met een differentieel thermo-element, toegepast om de spiraalvormige protonenbaan zeer nauwkeurig in het middenvlak tussen de poolplaten te kunnen leggen. Daartoe moesten de bekrachtigingsstromen van de beide grote magneetspoelen door middel van een extramachine een beetje verschillend worden gemaakt. Het „magnetische middenvlak" bleek nl. oorspronkelijk 1,2 cm lager te liggen dan het meetkundige.

De intensiteit van de inwendige bundel werd absoluut gemeten met behulp van een trefplaat van grafiet. Hierin wordt ^{11}C geproduceerd, door het proces $^{12}C(p, pn)^{11}C$. Aangezien ^{11}C uitsluitend positronen geeft, kan het aantal dezer reacties per tijdseenheid gemakkelijk bepaald worden door vergelijken van de uitgezonden straling met die van een standaard-γ-bron. Bovendien is voor deze reactie de werkingsdoorsnede — die de verhouding tussen het aantal reacties en het aantal bombarderende protonen geeft — goed bekend en voor protonen met energieën van de hier beschouwde waarde vrijwel onafhankelijk van de energie. Op een straal van 2 meter werd aldus een inwendige protonenstroom gevonden van 0,3 μA.

Ten einde een zo groot mogelijke intensiteit in de gedeflecteerde bundel te krijgen, waren uitvoerige magnetische metingen aan het deflectiekanaal vereist. Met de eerder genoemde lenzen kon de bundel in de experimenteerhal worden gefocusseerd tot een diameter van 3 cm op 5 m afstand achter de beschermingswand. De totale uitwendige protonenstroom bedraagt 1×10^{11} protonen per sec, d.i. ongeveer 6% van de inwendige stroom. Deze protonen bezitten een energie van 600 MeV.

In de experimenteerhal aan de andere zijde staan de positieve en negatieve π-mesonen uit de universele trefplaat ter beschikking. De energie van deze mesonen ligt tussen 70 en 320 MeV. De negatieve π-mesonen beschrijven een baan zoals geschetst in fig. 7. De grootste intensiteit treedt op bij 150 MeV en bedraagt 4×10^5 π-mesonen per sec. Van de positieve π-mesonen kan men, aangezien hun baan in dezelfde richting gekromd is als die van de protonen, alleen diegene die naar achteren uit de trefplaat treden, in een kanaal naar buiten brengen. Hiertoe verschuift men de Fermitrolley naar de juiste plaats, zie *fig. 8*. Ten gevolge van de minder gunstige uittreerichting uit de trefplaat (de π-mesonen worden reeds in dit energiegebied bij voorkeur in voorwaartse richting uitgezonden), is de intensiteit van de positieve π-mesonenstroom geringer. Hij bedraagt bij 70 MeV ceteris paribus globaal 10^4 π-mesonen per sec. Men

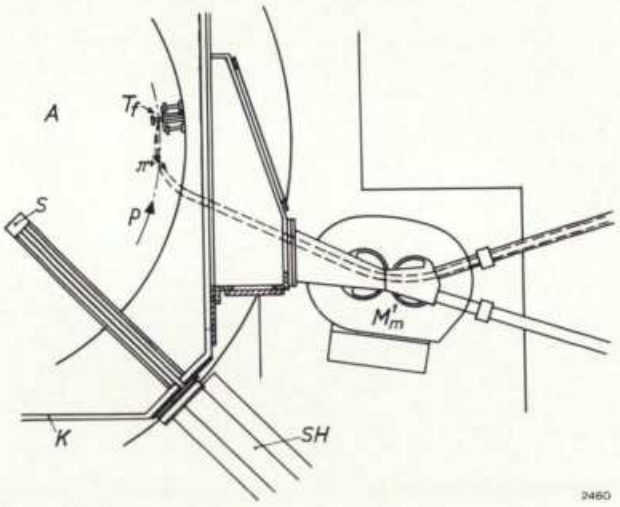


Fig. 8. Stand van de universele trefplaat T_f voor de produktie van positieve π-mesonen door de protonenbundel p. Betekenis der letters als in fig. 7.

kan ook π-mesonen in een uitwendige trefplaat produceren en ze van de protonenbundel scheiden door middel van een deflectiemagneet (zie de π^+-bundel in hal P in fig. 3).

Het reeds verrichte werk en verdere plannen

Nadat het cyclotron op 1 augustus 1957 voor het eerst met de maximale energie in werking was gesteld, hebben de fysici al spoedig hun experimenten hiermee kunnen beginnen. Er bleef toen slechts weinig tijd beschikbaar om veranderingen aan te brengen, die in de loop van de eerste maanden wenselijk gebleken waren. Na meer dan twee jaar gewerkt te hebben, is het cyclotron enige tijd stilgelegd om dergelijke veranderingen uit te voeren. O.a. zal het hoogfrequentiesysteem nog worden verbeterd, en er zullen wijzigingen worden aangebracht om het cyclotron met korte impulsen te doen werken, waarbij tevens de intensiteit van de protonenbundel zal kunnen worden opgevoerd. De beschermingswand met de kanalen voor de bundels wordt verbouwd, en er wordt door het inbouwen van quadrupoollenzen getracht de intensiteit van de π-mesonenstromen op te voeren. Bovendien wordt een serie quadrupoollenzen opgesteld om een krachtige bundel μ-mesonen voor verstrooiingsproeven te krijgen.

In de eerste twee jaar is de machine gedurende lange tijd 24 uur per dag in werking geweest. Een

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

reeks interessante experimenten is met succes bekroond. Een groep onderzoekers b.v. heeft kunnen aantonen dat behalve de normale ontleding van het π-meson in een μ-meson en een neutrino ook nog de veel zeldzamere ontleding van het π-meson in een elektron en een neutrino kan worden waargenomen [4]). Andere groepen hebben zich beziggehouden met de K-vangst van μ-mesonen in ^{12}C, om de wisselwerking van μ-mesonen en elektronen met de kern te onderzoeken. Weer andere experimenten hebben ten doel gehad de hypothese te toetsen dat processen met mesonen onafhankelijk van hun lading verlopen. Er is ook een chemische groep aan het werk, die verschillende kernreacties onderzoekt waarbij talrijke brokstukken ontstaan („spallation"). Daarnaast zijn een reeks groepen van gasten uit de ledenstaten met eigen onderzoekprogramma's begonnen. Speciaal deze gastenprogramma's worden thans na het opnieuw in werking komen van de machine op de voorgrond geplaatst.

[4]) F. Fazzini, G. Fidecaro, A. W. Merrisen, H. Paul en A. V. Tollestrup, The electron decay of the pion, Phys. Rev. Letters **1**, 247, 1958.

Samenvatting. Het synchrocyclotron van het CERN-laboratorium te Genève, dat sinds augustus 1957 in werking is, levert protonen van 600 MeV. De belangrijkste gezichtspunten bij de keuze van deze energie en bij het algemene ontwerp worden in dit artikel kort besproken. Opmerkelijk is de opzet van het gebouw, welke het mogelijk heeft gemaakt de achtergrond van algemene verstrooide straling in de experimenteerhallen zeer klein te houden. Na vermelding van de belangrijkste bijzonderheden van de constructie van de machine wordt ingegaan op de trefplaten en op de verkregen bundels van deeltjes. De inwendige protonenstroom bedraagt ca. 0,3 μA. Een efficiënt deflectiesysteem maakt het mogelijk ca. 6% van deze stroom naar buiten te brengen. Verder heeft men intensieve bundels van π-mesonen en μ-mesonen ter beschikking (per seconde 4×10^5 negatieve π-mesonen van 150 MeV, of 10^4 positieve π-mesonen van 70 MeV). Het artikel besluit met enkele mededelingen omtrent het programma van de onderzoekingen die met de machine worden gedaan.

II. DE HOOGFREQUENTIE-INSTALLATIE

door K. H. SCHMITTER *) en S. KORTLEVEN **). 621.384.611.2

De onderstaande beschrijving van de hoogfrequentie-installatie van het CERN-synchrocyclotron bevat behalve de belangrijkste technische bijzonderheden ook een korte uiteenzetting omtrent de theoretische overwegingen die geleid hebben tot de dimensionering van het hoogfrequente trillingssysteem. In het voorafgaande artikel, I, zijn enige gegevens vermeld die aan de dimensionering ten grondslag lagen (deeltjesenergie, magnetische inductie, afmetingen van de magneetpool, enz.); andere gegevens vloeiden voort uit het ontwerp van de modulator, die in artikel III wordt beschreven.

Grondslagen voor het ontwerp

De omloopfrequentie ω van de deeltjes in een cyclotron vertoont tijdens de versnelling door twee oorzaken een daling: 1) door de relativistische toeneming van de massa m der deeltjes, 2) door het feit dat de magnetische inductie B in radiale richting afneemt. Deze afneming is bij het rotatiesymmetrische cyclotron noodzakelijk om de banen der deeltjes te stabiliseren. Is m_0 de rustmassa van de deeltjes, e hun lading, r de straal van de baan en c de lichtsnelheid, dan treedt in de plaats van de bekende vergelijking:

$$\omega_0 = \frac{eB}{m_0}, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

die voor het klassieke cyclotron geldt, de algemenere vergelijking:

$$\omega(r) = \frac{e\,B(r)}{m_0 \sqrt{1+\left(\frac{r\,e\,B(r)}{m_0 c}\right)^2}}. \quad \ldots \quad (2)$$

Voor een deeltje ter plaatse r dat de aan deze r beantwoordende kinetische energie E_k bezit, moet de Dee-spanning de door verg. (2) gegeven frequentie hebben, opdat het deeltje bij zijn omloop precies in de pas met deze spanning blijft. Verg. (2) geeft dus de ideale frequentievariatie in een versnellingscyclus, welke variatie in het synchrocyclotron dient te worden gerealiseerd door de frequentiemodulatie van de Dee-spanning. In *fig. 1* zijn de kromme $B(r)$ (zie het artikel I, fig. 6) en de voor protonen geldende kromme $\omega(r)$ getekend, alsook de kromme voor de bijbehorende energie $E_k(r)$. Zoals men ziet, moet de frequentie $\omega/2\pi$ voor protonen bij een inductie van 1,9 Wb/m² in de as aanvankelijk ongeveer 29 MHz bedragen, en bij het

*) Max Planck-Institut für Physik und Astrophysik, München; voordien verbonden aan de CERN, Genève.
**) Hoofdindustriegroep PIT (Produkten voor Industriële Toepassing), Philips, Eindhoven.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

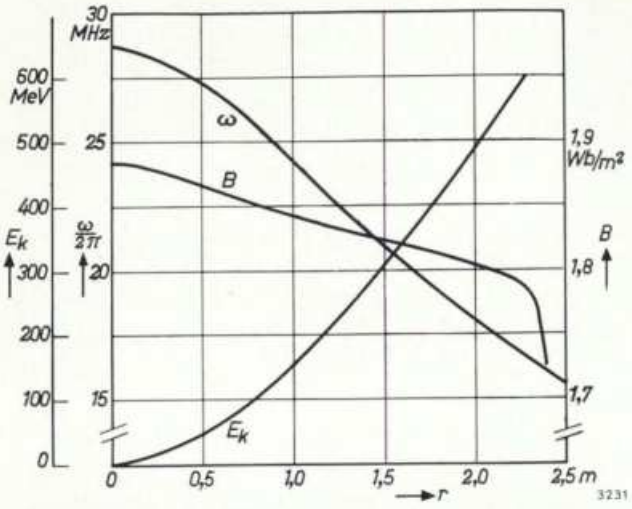


Fig. 1. Uitgezet zijn het radiale verloop $B(r)$ van de magnetische inductie bij het CERN-synchrocyclotron, de hierbij behorende frequentievariatie $\omega(r)$ voor de versnelling van protonen, en de radiale toeneming van de kinetische energie $E_k(r)$ van de protonen.

bereiken van een energie van 600 MeV, die aan de grensradius van 2,27 m van de stabiele baan beantwoordt (zie I), moet deze frequentie tot 16,5 MHz gedaald zijn.

Algemeen geldt, naar uit het bovenstaande blijkt, dat de frequentiezwaai groter moet zijn naarmate men grotere energieën wil bereiken [1]). Dit is een van de oorzaken waardoor de constructie van een groot synchrocyclotron uit een oogpunt van hoogfrequentietechniek bepaald tot de moeilijke opgaven moet worden gerekend.

De manier waarop de frequentie van de Dee-spanning tussen de afgeleide grenswaarden moet variëren als functie van de tijd, is door het bovenstaande nog niet ondubbelzinnig vastgelegd. Er moet nog worden voldaan aan de voorwaarde dat de frequentievariatie per omloop van de deeltjes $(\dot{\omega}/\omega)$ juist beantwoordt aan de energiewinst van het deeltje per omloop. Hieruit kan men voor ieder gegeven verloop van de frequentie een ideaal programma afleiden voor de amplitude $\hat{U}$ van de Dee-spanning, die immers de energiewinst per omloop bepaalt. Zou men de straal van de baan der deeltjes evenredig met de tijd willen laten toenemen — in welk geval de kromme $\omega(r)$ in fig. 1 tevens het verloop met de *tijd* (het frequentieprogramma) zou voorstellen —, dan was $\hat{U} = \text{const.}$ het bijbehorende ideale amplitudeprogramma.

In werkelijkheid echter geldt, 1) dat men de keus van amplitude- en frequentieprogramma slechts in beperkte mate in de hand heeft, met name doordat de Dee-spanning reeds van nature met de frequentie varieert, zoals we nog nader zullen zien; 2) dat het gelukkig niet nodig is dat het verloop van de frequentie en het verloop van de amplitude nauwkeurig bij elkaar passen. Het nauwkeurig bij elkaar passen betekent namelijk dat een deeltje bij iedere omloop de Dee-spleet met dezelfde faze φ ten opzichte van de Dee-spanning passeert, en wel met $\varphi = -30°$. (Zulke deeltjes zijn dan 60° in faze achter bij die deeltjes die de Dee-spleet juist ten tijde van de maximale Dee-spanning passeren, waarvoor per definitie $\varphi = -90°$ wordt gesteld.) Er mag echter dank zij de fazefocussering, die kenmerkend is voor de werking van het synchrocyclotron, een zekere variatie in de faze optreden; een afwijking van de gekozen waarde van φ heeft slechts tot gevolg dat het fazegebied van de deeltjes die door de focussering worden meegenomen, enigszins verandert, en hierdoor verandert dan ook de verkregen bundelstroom van het cyclotron. De waarde $\varphi = -30°$ wordt in het algemeen als de gunstigste beschouwd. Bij $\varphi = -90°$ profiteert weliswaar de versnelling van de grootst mogelijke momentele waarde van de Dee-spanning, maar de fazefocussering faalt, aangezien in deze situatie geen reserve aan versnelling beschikbaar is voor de te langzaam lopende deeltjes. Bij $\varphi = -30°$ neemt de focussering alle deeltjes mee in een fazegebied van $-150°$ tot $+40°$ [2]), er gaat slechts 10% van de beschikbare deeltjes verloren, en de versnellende momentele Dee-spanning bedraagt althans nog de helft van de maximale waarde.

De praktische consequentie van het bovenstaande is dat de werkelijke amplitude van de Dee-spanning veiligheidshalve de „ideale" altijd dient te overtreffen. De hiermee gepaard gaande toeneming van de bundelstroom staat weliswaar in generlei verhouding tot de hogere eisen die aan de apparatuur worden gesteld om de hogere Dee-spanning te krijgen, maar men is er dan zeker van dat de Dee-spanning ook bij een „deuk" in het amplitudeverloop, die soms bij bepaalde frequenties optreedt, nooit beneden de ideale waarde daalt: de bundelstroom zou in het laatste geval snel dalen, aangezien tijdens het doorlopen van het frequentiegebied van zo'n deuk vele deeltjes die niet nauwkeurig in de pas meelopen, verloren zouden gaan.

De amplitude van de Dee-spanning en het amplitudeprogramma leggen bij benadering de toelaatbare herhalingsfrequentie van het versnellingsproces (de modulatiefrequentie) vast. Ieder proton

[1]) Ter vergelijking zij vermeld dat bij het vroeger in dit tijdschrift beschreven synchrocyclotron, dat door Philips voor het Kernfysisch Instituut (IKO) te Amsterdam werd gebouwd en dat deuteronen van 28 MeV levert, de frequentiezwaai slechts 4% bedraagt; zie Philips techn. T. **12**, 248, 1950.

[2]) D. Bohm en L. L. Foldy, Phys. Rev. **72**, 649, 1947. Zie ook W. de Groot, Philips techn. T. **12**, 65, 1950.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

heeft, bij een gemiddelde faze $\varphi = -30°$ en bij een Dee-spanning $\hat{U}$ van zeg 4 kV bij 29 MHz en 8 kV bij 16,5 MHz, een energiewinst van gemiddeld ca. 200 MeV per milliseconde; het zou dus de eindenergie van 600 MeV in ongeveer $^1/_{300}$ seconde bereiken. Aangezien het geschikte verloop van de frequentie slechts gedurende ongeveer $^1/_3$ gedeelte van de modulatieperiode optreedt, volgt hieruit een maximaal toelaatbare waarde van ongeveer 100 Hz voor de modulatiefrequentie. Helaas is het door de beperkte mechanische sterkte van het materiaal van de mechanische modulator, zoals uit het artikel III zal blijken, onmogelijk een zo hoge modulatiefrequentie te realiseren [3]). Deze werd derhalve aanvankelijk op 50 Hz gesteld, waarbij men eraan dacht de netfrequentie te gebruiken. Toen echter bleek dat de netfrequentie niet voldoende constant was, besloot men een speciale generator te gebruiken, en om dan eventuele storingen door zwevingen met de netfrequentie te vermijden, werd de modulatiefrequentie vervolgens vastgesteld op 55 Hz.

Voor het ontwerp van de hoogfrequentie-installatie was nog een raming nodig van het vereiste vermogen. Zoals bij de meeste deeltjesversnellers, speelt daarbij het vermogen, nodig voor de eigenlijke versnelling, slechts een ondergeschikte rol. Gedacht werd aan een gemiddelde deeltjesstroom van 0,5 μA; bij een eindenergie van 600 MeV kan dan van de deeltjesbundel een vermogen van 300 W worden afgenomen. Houdt men rekening met de deeltjes die tijdens het versnellingsproces verloren gaan, dan kan het gemiddelde voor de versnelling vereiste hoogfrequentievermogen worden geraamd op ongeveer 1 kW. De jouleverliezen in het Dee-systeem echter, alsook andere verliezen, waarvan de aard nog niet geheel is opgehelderd maar die in het algemeen bij cyclotrons optreden, zijn zeer veel groter dan het vermogen dat voor de eigenlijke versnelling nodig is, zodat werd uitgegaan van een vermogen van de zender van 10 tot 20 kW [4]).

Het ontwerp van het Dee-systeem

Het Dee-systeem als resonerend lechersysteem

De versnellingselektrodes bij een synchrocyclotron worden gewoonlijk slechts met één Dee uitgevoerd (zie I). Deze Dee vormt met zijn toevoerleiding de binnengeleider van een coaxiaal lechersysteem, dat in resonantie moet worden gebracht (binnen- en buitengeleider van het lechersysteem hebben hier in werkelijkheid een rechthoekige doorsnede en de binnengeleider is zelf hol). Andere vormen van resonatoren komen niet in aanmerking ten gevolge van de stralingsverliezen. We gaan ervan uit dat de resonator wordt geëxciteerd in zijn grondtrilling, waarbij hij naar gelang van de „randvoorwaarden", die door de modulator in het ritme van de herhalingsfrequentie (55 Hz) worden gevarieerd, een verschillende „elektrische lengte" krijgt. De variatie wordt in ons geval teweeggebracht door de variabele capaciteit C_M van de stemvork.

In het eenvoudigste geval, dat is weergegeven in *fig. 2*, zou op de resonator bij de limietwaarde $C_M = 0$ (leiding aan beide kanten open) een halve golf

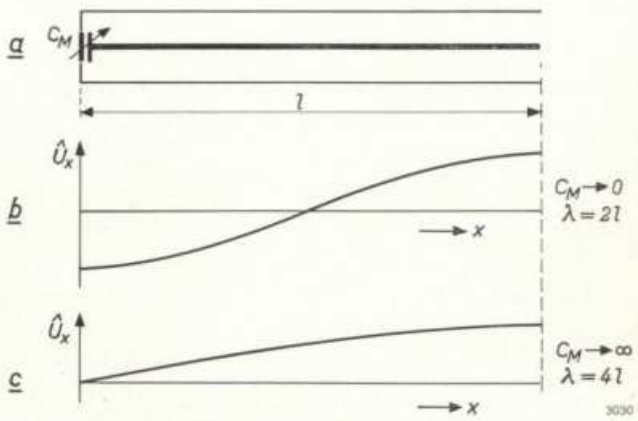


Fig. 2. *a*) Eenvoudigste vorm van een coaxiaal lechersysteem met aangekoppelde modulatiecondensator C_M.
b) en *c*) Op de resonator staat bij de limietwaarden $C_M = 0$ en $C_M = \infty$ respectievelijk een halve golf en een kwart golf (uitgezet is de spanningsamplitude $\hat{U}_x$ als functie van de plaats x).

staan, bij de andere limietwaarde $C_M = \infty$ (leiding aan één kant hoogfrequent kortgesloten) een kwart golf. De bijbehorende eigen frequenties zouden tot elkaar staan als 2 : 1. Aangezien de te realiseren capaciteitsvariatie binnen veel nauwere grenzen lag dan tussen 0 en ∞ — bij de geprojecteerde stemvorkmodulator tussen 256 en 2580 pF — kon met deze opstelling klaarblijkelijk de vereiste frequentiezwaai van 29 tot 16,5 MHz *niet* worden bereikt.

Men kan een grotere variatie van de frequentie verkrijgen indien men de modulatiecondensator door middel van een zelfinductie aanvult tot een serieresonantiekring (*fig. 3a*) [5]). Deze zelfinductie

[3]) Er dient op gewezen te worden dat ook bij toepassing van een roterende condensator, in plaats van de stemvork, de materiaaleigenschappen een soortgelijke grens aan de frequentie zouden hebben gesteld.

[4]) Ter vergelijking zij nog eens gewezen op het synchrocyclotron te Amsterdam: daar bedraagt het „rendement" (vermogen op de trefplaat gedeeld door het vermogen van de zender) circa 15%, hetgeen als buitengewoon hoog wordt beschouwd.

[5]) Een parallelresonantiekring is eveneens mogelijk, leidt echter tot minder gunstige oplossingen. De nogal ingewikkelde beschouwingen hieromtrent zijn weergegeven in: K. H. Schmitter, CERN-rapport 59-33 van 22 sept. 1959, waar ook andere kwesties betreffende het resonatorsysteem uitvoerig zijn besproken. Zie ook M. Morpurgo, CERN-rapport SC 136, 1955.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

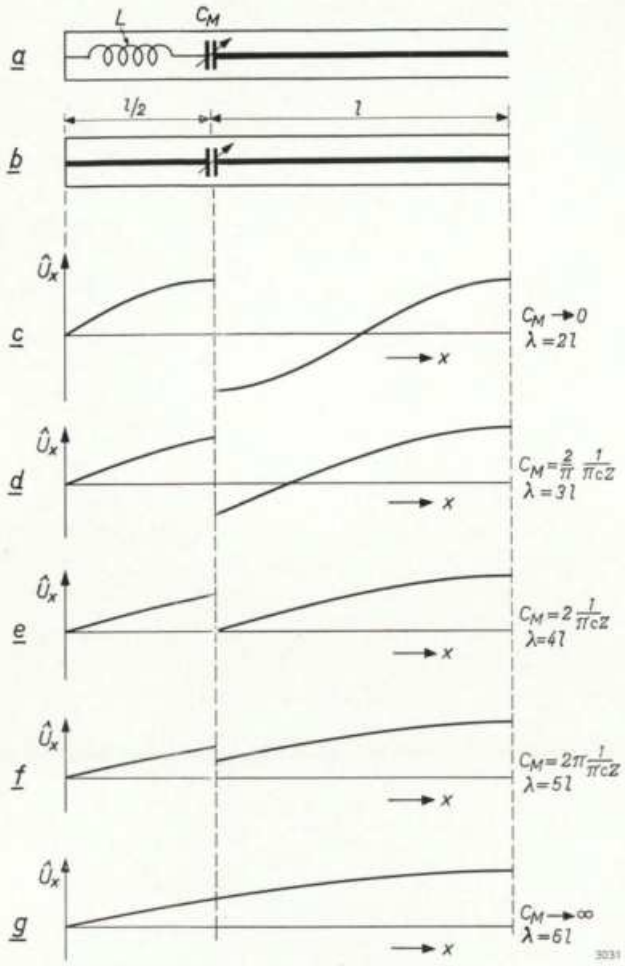


Fig. 3. *a*) De modulatiecondensator wordt tot een serieresonantieketen aangevuld door een zelfinductie *L*.
b) Deze zelfinductie wordt in werkelijkheid uitgevoerd als een kortgesloten stuk leiding („stub").
c)-*g*) Spanningsverdeling op de aldus gevormde resonator, bij verschillende waarden van de capaciteit C_M. De gevallen (*d*) en (*f*) beantwoorden ongeveer aan de uiterste waarden die met de stemvorkcondensator kunnen worden bereikt.

voert men uit als een kortgesloten stuk lecherleiding („stub", fig. 3*b*). In het eenvoudigste geval, waarbij o.a. een overal gelijke golfweerstand is ondersteld, krijgt men dan bij de limietwaarden $C_M = 0$ en $C_M = \infty$ en enige tussengelegen waarden de spanningsverdelingen volgens fig. 3*c*-*g*. Op het gehele systeem staat $^3/_4$ golf in het ene en $^1/_4$ golf in het andere grensgeval. De uiterste frequenties staan dus in het ideale geval tot elkaar als 3 : 1. De gewenste frequentiezwaai (29 : 16,5) kwam daarmee reeds in zicht, maar men ziet uit de getekende gevallen (*d*) en (*f*) dat bij een capaciteitsverhouding $C_{Mmax} : C_{Mmin} = \pi^2 = 9{,}85$ pas een frequentieverhouding van 5 : 3 (= 29 : 17,5) wordt bereikt. Men was dus nog niet aan het doel, en de laatste loodjes wogen ook in dit geval het zwaarst.

Alvorens hierop in te gaan, wijzen we nog even op het geval van fig. 3*f*, dat beantwoordt aan de grootste verkrijgbare capaciteit C_{Mmax}, dus aan de laagste frequentie. Men ziet dat in dit geval de resonator van de Dee-mond tot aan de modulator een elektrische lengte $l = {}^1/_5 \lambda_{max}$ moet hebben. Met behulp van $f_{min} = 16{,}5$ MHz volgt hieruit $l = 3{,}75$ m. Aangezien de lengte van de Dee ongeveer gelijk is aan de straal van de magneetpool, dus 2,5 m, moest de Dee nog van een verlengstuk, de steel of hals, worden voorzien. Dit was trouwens om technische redenen ook heel welkom, 1) omdat men dan meer plaats krijgt voor de modulator — naarmate men een cyclotron groter maakt, wordt het gevaar reëler dat het gehele hoogfrequentiesysteem tussen de bekrachtigingsspoelen van de grote magneet bekneld raakt —, 2) omdat dan de modulatiecondensator verder buiten het bereik van het spreidingsveld van de magneet komt te staan (zie III).

De manier waarop de frequentiezwaai ten slotte tot de vereiste waarde werd verhoogd, kan worden toegelicht door een beschouwing van de invloed van de golfweerstand. Om te beginnen, zal bij een gegeven capaciteitsvariatie ΔC_M van de modulator de frequentiezwaai groter zijn naarmate minder capaciteit met de modulator parallel geschakeld is. Het is dus van belang de capaciteit van de Dee zo klein mogelijk te houden, d.w.z. de Dee niet groter te maken dan beslist noodzakelijk is (gelijk aan de halve oppervlakte van de magneetpolen). De golfweerstand van de Dee, die volgens de formule voor de homogene leiding $\zeta = \sqrt{L_I/C_I}$ zal bedragen (L_I en C_I zijn resp. de zelfinductie en de capaciteit per lengte-eenheid), wordt daarmee zo groot mogelijk. Voor een nadere beschouwing zal rekening gehouden moeten worden met het feit dat de Dee — zoals op zuiver meetkundige gronden duidelijk is, zie het model in *fig. 4* — geenszins als een homogene leiding kan worden opgevat, en men komt aldus vanzelf tot de vraag of de situatie niet eventueel gunstiger kan worden indien men de tot nu toe gemaakte onderstelling dat men met een homogeen resonatorsysteem te maken heeft (met overal dezelfde golfweerstand), ook laat vallen ten aanzien van Dee-hals en stub. Inderdaad blijkt het gunstig te zijn de golfweerstand van de Dee-hals groter te maken dan die van de Dee, en iets soortgelijks vindt men voor de stub, zoals in het eerste in noot [5]) aangehaalde rapport is uiteengezet. (Voor de stub kan men dit heel globaal inzien door te bedenken dat een grote golfweerstand betekent dat men het ideale geval van een zuivere zelfinductie volgens fig. 3 benadert.) Weliswaar kon men van de hieruit voortvloeiende mogelijkheden om de frequentiezwaai te vergroten toch niet ten volle gebruik maken, o.a. doordat de bereikbare frequentievariatie

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

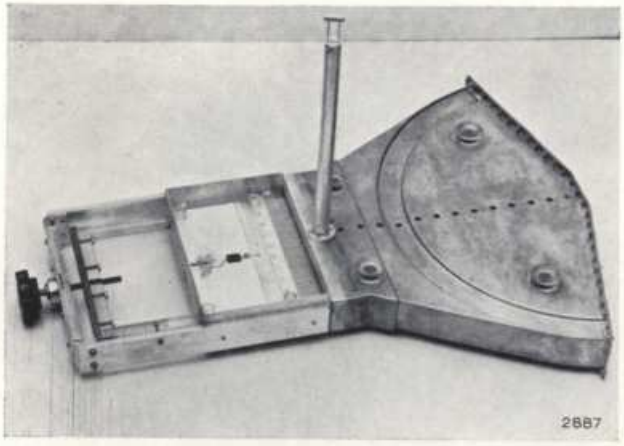


Fig. 4. Model van de resonator op schaal 1 : 10. De foto toont de buitengeleider van het „coaxiale" systeem, die echter aan de linkerkant (bij de modulatiecondensator en de stub) verwijderd is. Rechts bevindt zich in deze buitengeleider de Dee. De geheel links aan het systeem bevestigde beugel kan door een stelschroef worden verplaatst, waardoor de capaciteit van de stemvorkimitatie (een constructie met in elkaar grijpende kammen) wordt veranderd.

bij gegeven ΔC_M ook wordt beperkt door de stroom- en spanningsbelasting van de modulatiecondensator. Toch lukte het op deze wijze ten slotte, nadat empirisch een geschikt compromis was gevonden, de vereiste frequentiezwaai te verwezenlijken.

Dat de stroom- en spanningsbelasting mede van invloed zijn, hangt daarmee samen dat de frequentievariatie bij gegeven ΔC_M rechtstreeks verband houdt met de variatie van het reactieve vermogen in de condensator. Dit verband blijft bestaan, hoe men ook de schakeling van de condensator varieert; aan de hand van enkele eenvoudige voorbeelden kan men dit gemakkelijk verifiëren.

Alvorens nu de nadere dimensionering van de resonator te bespreken, maken we nog één opmerking. We hebben het Dee-systeem beschouwd als een systeem met één dimensie, d.w.z. we hebben aangenomen dat op alle plaatsen van de Dee-mond de spanning in dezelfde faze en met dezelfde amplitude varieert. Eén blik op fig. 4 zal duidelijk maken dat er ook trillingsvormen moeten zijn waarbij dit niet het geval is, d.w.z. waarbij dwarstrillingen in de Dee optreden. Zulke trillingen („parasieten") zijn natuurlijk ongewenst. Aangezien het aannemelijk is dat vooral dwarstrillingen met een stroombuik op de symmetrie-as kunnen optreden, heeft men bij sommige cyclotrons, om aan dergelijke trillingen de pas af te snijden, bij de constructie van de Dee een spleet langs de symmetrie-as aangebracht. De lengtetrillingen worden door deze spleet niet gehinderd. In ons geval bleek het systeem zo goed symmetrisch te zijn dat deze maatregel onnodig was. Gevaarlijk waren alleen parasieten die optraden ten gevolge van de toevoerleidingen naar de oscillator (ongewenste, van fig. 3 verschillende, trillingsvormen in de lengterichting). Nadat we tot het principe van de vliegwieloscillator waren overgegaan, dat hieronder nog zal worden besproken, veroorzaakten echter ook parasieten van dit soort generlei moeilijkheden meer, terwijl het bij de bouw van andere cyclotrons soms maandenlang tobben geweest is om de parasieten te bestrijden.

Dimensionering van de resonator

Uit het gewenste frequentieprogramma en de capaciteitsvariatie van de stemvork kunnen op grond van bovenstaande beschouwingen de afmetingen van een resonator volgens fig. 3 bij benadering worden berekend, mits de golfweerstand van de Dee bekend is. Zoals reeds is opgemerkt, is de Dee natuurlijk geen homogene leiding. Een voldoende benadering werd verkregen door de Dee te vervangen door vijf achter elkaar geschakelde, even lange, ieder op zichzelf homogene stukken leiding, waarvan het eerste is belast met de capaciteit van 200 pF van de Dee-mond (*fig. 5*). Voor ieder stuk leiding kan men de golfweerstand berekenen en daarmee ook de reactantie van het hele systeem als

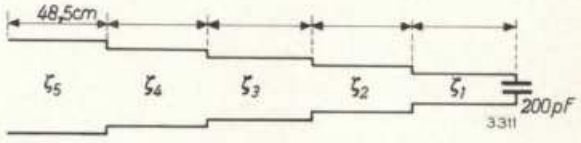


Fig. 5. Benadering van de Dee door een leiding met trapsgewijze constante golfweerstand ζ, waarbij het eerste stuk leiding belast is met de capaciteit van de Dee-mond. De getekende trapjes in de Dee geven symbolisch de variatie van ζ weer.

functie van de frequentie (*fig. 6*). Een vergelijking van de reactantiekromme met die voor een homogene leiding ter vervanging van de Dee (gestippelde kromme in fig. 6) demonstreert de invloed van de betere benadering.

De nadere dimensionering van de resonator gebeurde in werkelijkheid, zoals voor dergelijke gecompliceerde systemen gebruikelijk is, half empi-

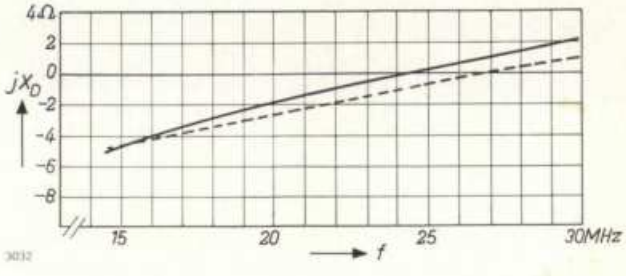


Fig. 6. Berekende reactantie van de volgens fig. 5 samengestelde Dee als functie van de frequentie. Gestippeld is het verloop van de reactantie getekend dat men berekent als men de Dee als homogene leiding beschouwt.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

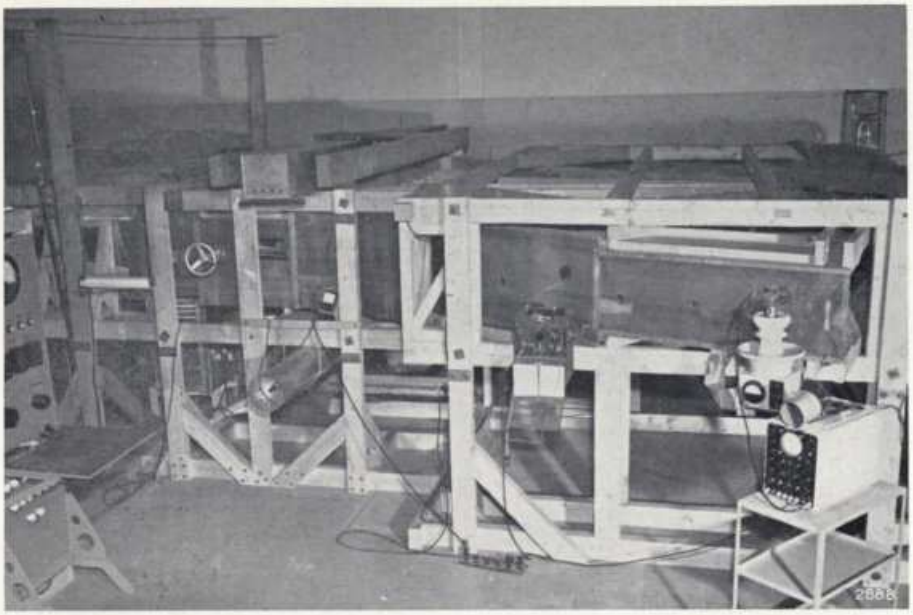


Fig. 7. Het model op schaal 1 : 1 van de resonator (houten geraamte, bekleed met koperen platen), dat in Eindhoven is gebouwd, met meetinrichtingen voor het beproeven van de hoogfrequentiegenerator.

risch, d.w.z. de geschetste berekening werd doorlopend aangevuld en verbeterd aan de hand van parallel lopende proeven aan modellen. Er werd een model vervaardigd op schaal 1 : 10 (dus voor 10× zo hoge frequenties) en een model op natuurlijke grootte. Het kleine model hebben we reeds in fig. 4 afgebeeld, het model 1 : 1 ziet men in *fig. 7*. Bovendien werden metingen gedaan aan een model op lengteschaal 1 : 1 en dwarsschaal 1 : 7. Het model 1 : 1 werd ook gebruikt voor het ontwikkelen en beproeven van de hoogfrequentiegenerator. Dit model — een houten geraamte, bekleed met koperen platen — was zo geconstrueerd dat de golfweerstanden van Dee-hals en stub onafhankelijk van elkaar konden worden gevarieerd door verandering van de afstanden van de buitengeleider („liner"). Bovendien was het mogelijk de lengte van de stub te veranderen. De modulator was in dit model uitgevoerd als een imitatie van de stemvork, waarvan de capaciteit door instelling van een luchtspleet kon worden gevarieerd van 250 tot 2700 pF.

De hoofdafmetingen van de definitieve uitvoering van de resonator zijn weergegeven in *fig. 8*. Het hieraan gemeten verloop van de eigen frequentie als functie van de capaciteit van de stemvork ziet men in *fig. 9*. Het aansluitpunt van de generator werd hierbij zo dicht mogelijk bij het kortgesloten einde van de stub gelegd. De capacitieve reactantie van de generator verlaagt namelijk (vooral) de hoogste bereikbare frequentie, en wel des te meer naarmate het aansluitpunt verder verwijderd is van het kortgesloten einde. Dit is het eenvoudigst in te zien

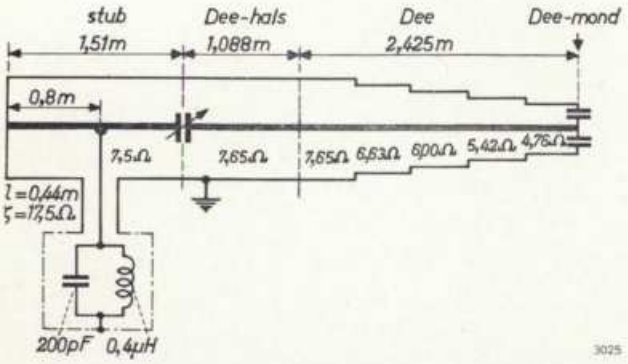


Fig. 8. Hoofdafmetingen en golfweerstand van de gedeelten van de resonator in de definitieve uitvoering.

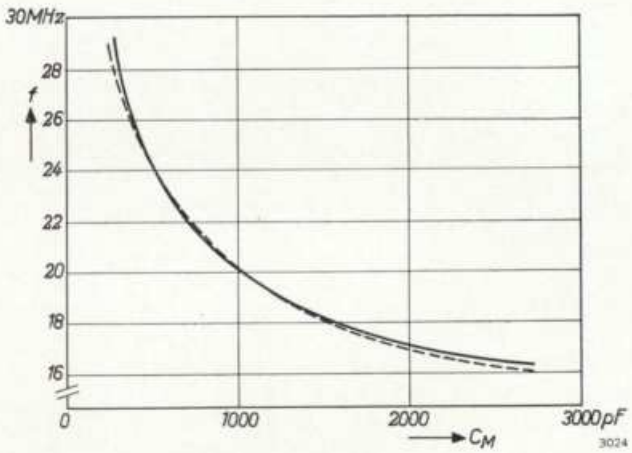


Fig. 9. Gemeten variatie van de eigen frequentie f van de resonator als functie van de stemvorkcapaciteit C_M. Gestippelde kromme: de berekende variatie.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

wanneer men bedenkt dat ten gevolge van de capaciteit van de generator (in hoofdzaak de anode-capaciteit van de zendbuis) de werking van de zelfinductie, die speciaal ter vergroting van de frequentiezwaai is aangebracht (fig. 3*a*), ten dele weer wordt opgeheven. Anderzijds moet het aansluitpunt ver genoeg van het kortgesloten einde verwijderd zijn opdat de impedantie in de anodekring niet te klein wordt: het zou anders niet mogelijk zijn in het gehele variatiegebied van de frequentie te voldoen aan de oscillatievoorwaarde. De vereiste minimumafstand werd empirisch bepaald aan het model op schaal 1 : 1. In fig. 9 is gestippeld ook het verloop van de frequentie getekend dat op grond van de bekende generatorreactantie werd berekend. *Fig. 10* toont hoe de frequentie als functie van de tijd verloopt als de stemvork sinusvormige trillingen uitvoert (zie III).

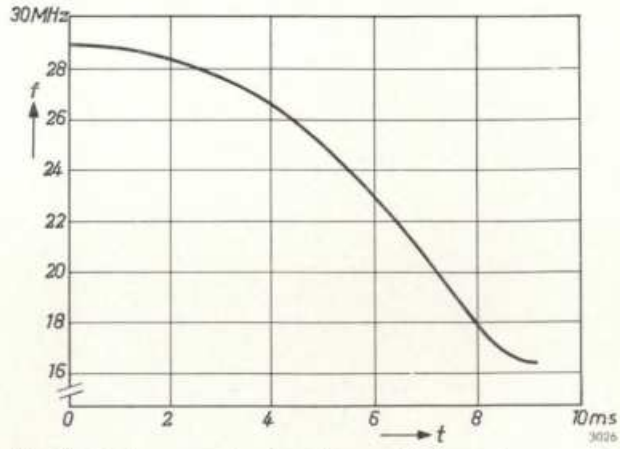


Fig. 10. Verloop van de eigen frequentie f van de resonator met aangekoppelde oscillator als functie van de tijd, bij sinusvormige trilling van de stemvork.

Fig. 11 geeft een overzicht van de spannings- en stroomverdeling over het systeem bij de twee uiterste frequenties, voor het geval van voeding met een constante amplitude van 5,4 kV van de hoogfrequente spanning (hetgeen beantwoordt aan een anodegelijkspanning van de oscillatorbuis van 5 kV). Men ziet dat er op de stub stroomamplitudes van 3000 A optreden en dat de spanning aan de Dee-mond toeneemt van ongeveer 5 kV bij 29 MHz tot ongeveer 19 kV bij 16,5 MHz. Berekent men de Dee-spanningsamplitude voor de tussengelegen frequenties, dan verkrijgt men de kromme van *fig. 12*. Deze kromme dient te worden vergeleken met het ideale amplitudeprogramma dat past bij het frequentieverloop volgens fig. 10, indien men de faze constant gelijk $-30°$ wil hebben (zie blz. 158). De optredende afwijkingen zijn, zoals uit de vroeger gegeven uiteenzetting volgt, gunstig om bij de versnelling een zo groot mogelijk aantal deeltjes mee te nemen, en ze leveren de gewenste reserve voor het geval er in het amplitudeverloop van de Dee-spanning deuken optreden.

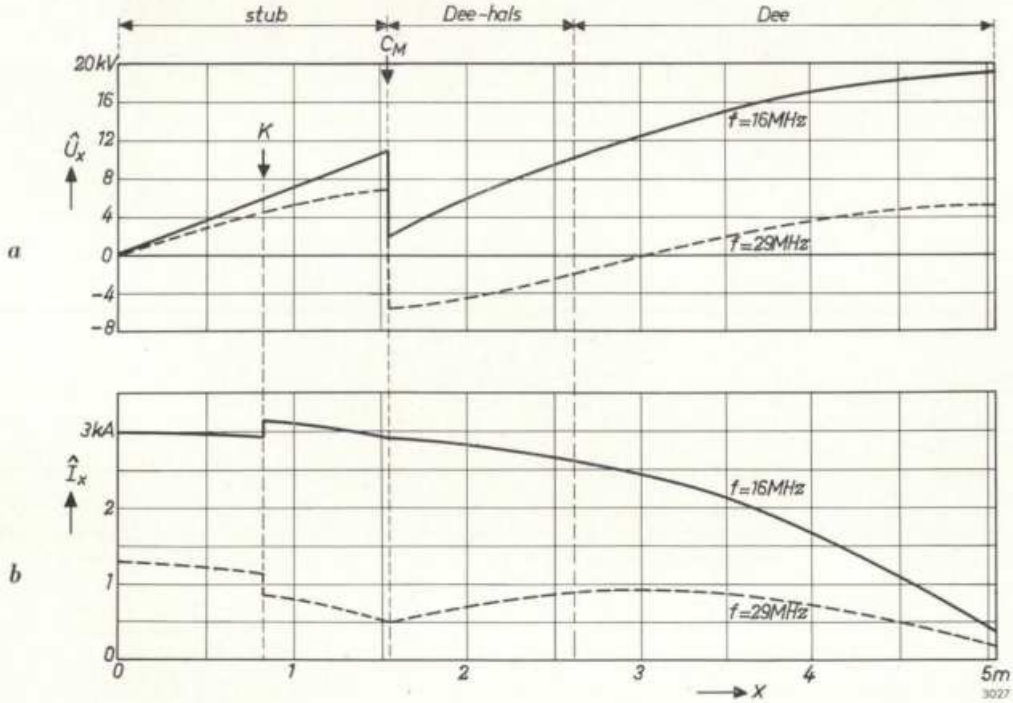


Fig. 11. *a*) Verdeling van de spanningsamplitude $\hat{U}$ en *b*) van de stroomamplitude $\hat{I}$ over de resonator, bij de frequenties $f = 16$ MHz en $f = 29$ MHz. De abscis x is de afstand van het stub-einde. In het punt K wordt de hoogfrequente spanning van de oscillator toegevoerd, en wel is voor beide frequenties ondersteld dat de hoogfrequente spanningsamplitude aan het begin van de leiding die van de oscillator komt, 5,4 kV bedraagt.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

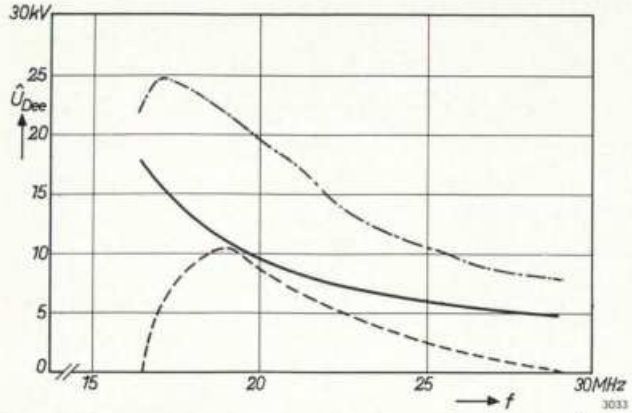


Fig. 12. Getrokken kromme: amplitude van de spanning $\hat{U}_{Dee}$ aan de Dee-mond, berekend als functie van de frequentie f. Gestippelde kromme: het ideale amplitudeprogramma dat zou passen bij de frequentievariatie volgens fig. 10. Punt-streepkromme: werkelijk verloop van de amplitude van de spanning.

Overigens is het in werkelijkheid niet goed mogelijk de voeding met constante generatorspanningsamplitude te doen plaatsvinden, aangezien de uitsturing van de generator met de frequentie varieert door de variatie van de belasting. Dientengevolge heeft in de praktijk de Dee-spanning een nog enigszins afwijkend amplitudeverloop; zie de punt-streeplijn in fig. 12. Het ombuigen van de kromme bij de laagste frequenties is daaraan te wijten dat de generator bij deze frequentie te maken heeft met een kring met betrekkelijk grote capaciteit en kleine zelfinductie; een dergelijke kring is moeilijk aan het trillen te krijgen, zoals men voor het geval van het mechanische analogon van een stijve veer met een zeer geringe massa gemakkelijk aanvoelen kan. Bij de hogere frequenties heeft de generator te maken met een meer normale trillingskring. De relatief grote beginspanning die men hierdoor krijgt, is zeer nuttig om een zo groot mogelijk aantal ionen uit het ruimteladingsgebied nabij de as van het cyclotron te trekken en aan het versnellingsproces te doen deelnemen.

Uitvoering van de resonator

De gehele resonator, bestaande uit Dee, Dee-hals, stemvork en stub, bevindt zich in hoogvacuüm. De stub is namelijk ondergebracht in een doos die via een tussenstuk verbonden is met de versnellingskamer van de machine. *Fig. 13* toont de resonator van boven gezien, in *fig. 14* is een lengtedoorsnede weergegeven. Dee-hals H en Dee D vormen constructief een geheel. Dit wordt enerzijds gesteund door twee bolisolatoren Is_1, op twee plaatsen niet ver van de einden van de Dee-mond, en het is anderzijds op twee plaatsen van de Dee-hals opgehangen aan vacuümdichte doorvoeringsisolatoren Is_2. De bolisolatoren rusten op de onderste poolplaat P_2 van de magneet, welke plaat de bodem van de versnellingskamer vormt, en ze kunnen hierop een kleine rollende beweging uitvoeren. Dank zij deze légering van Dee en Dee-hals kunnen vervormingen door de thermische uitzetting of door de magnetische krachten optreden zonder dat zich noemenswaardige mechanische spanningen in de lengterichting voordoen. (Bij het inschakelen van de enorme magneet naderen de bovenste en de onderste poolplaat enige millimeters tot elkaar!) Dwarsspanningen worden opgenomen door de doorleidingsisolatoren Is_2, die speciaal hiervoor geconstrueerd zijn. De verstijvingen die de bovenste en de onderste platen van de Dee dragen (fig. 13), zijn een beetje naar boven doorgezet, zodanig dat bij het doorzakken dat optreedt als de constructie slechts door de twee ver van elkaar gelegen bolisolatoren wordt gesteund, de platen juist vlak worden. *Fig. 15* geeft een foto van de Dee, gemonteerd tussen de poolplaten; men ziet de betrekkelijk nauwe Dee-mond en de verstijvingen.

De bolisolatoren zijn door metalen schermen omgeven, om te beletten dat er versnelde deeltjes op vallen. De Dee-mond, de zijkanten van de Dee en van de Dee-hals en de aanrakingsvlakken van de bolisolatoren worden met water gekoeld. Voor deze koeling van het Dee-systeem zijn twee parallelgeschakelde koelkringen aangebracht, waarbij in ieder het koelwater ter isolatie tegen aarde wordt toe- en afgevoerd via twee ca. 10 meter lange

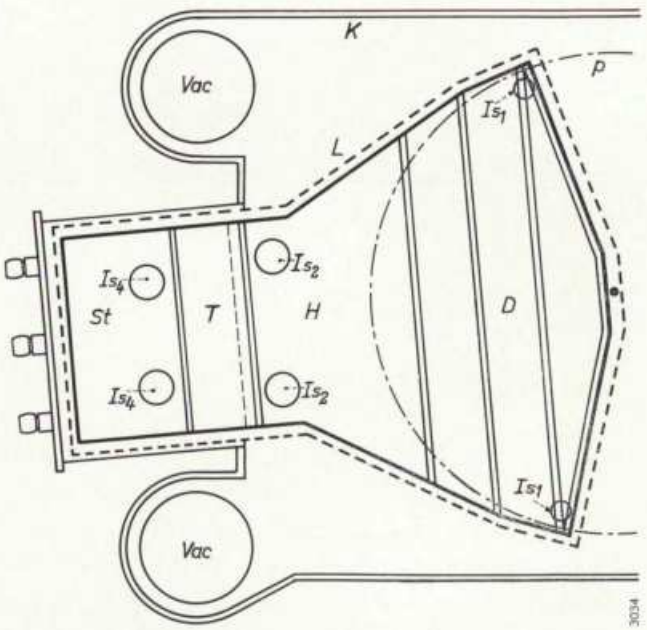


Fig. 13. Constructie van de resonator en zijn plaatsing in het cyclotron. D Dee met verstijvingen, ondersteund in de beide punten Is_1. H Dee-hals, opgehangen in de twee punten Is_2. T stemvork. St stub, opgehangen in de beide punten Is_4. L buitengeleider van de resonator. K versnellingskamer. *Vac* pompen. p uiterste protonenbaan.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

slangen van hard polyvinylchloride. De slangen zijn opgewikkeld en geplaatst in de kamer Q. Ze lopen door de isolatoren Is_2 naar het Dee-systeem.

Loodrecht onder de isolatoren Is_2 bevinden zich nog twee identieke isolatoren Is_3, die echter geen dragende functie hebben maar alleen als isolerende doorleiding dienen voor de leidingen die naar de stemvorktasters X gaan (zie het artikel III, blz. 186).

De stub St met de hieraan bevestigde stemvork T hangt aan twee isolatoren Is_4, die boven op de stubdoos G liggen en die van dezelfde constructie zijn als de isolatoren Is_2. De mogelijkheid om er leidingen door te leggen, wordt bij deze isolatoren toevoerleidingen lopen door de achterwand van de stubdoos. Als het cyclotron werkt, hangt de gehele stubdoos vrij aan de flensverbinding F, waarmee hij aan het tussenstuk naar de versnellingskamer is bevestigd. Hierdoor wordt het overbrengen van vloertrillingen, afkomstig van de pompen enz., op de stubdoos en op de stemvork vermeden, en de doos kan eventuele positieveranderingen van de hoofdmassa van het cyclotron (zie boven) volgen zonder dat er spanningen optreden. Vervormingen van de doos zelf doen niets af aan de nauwkeurige handhaving van de onderlinge positie van de stemvork T (aan de stub) en de bijbehorende stator S (aan de Dee-hals), aangezien deze positie door de tasters

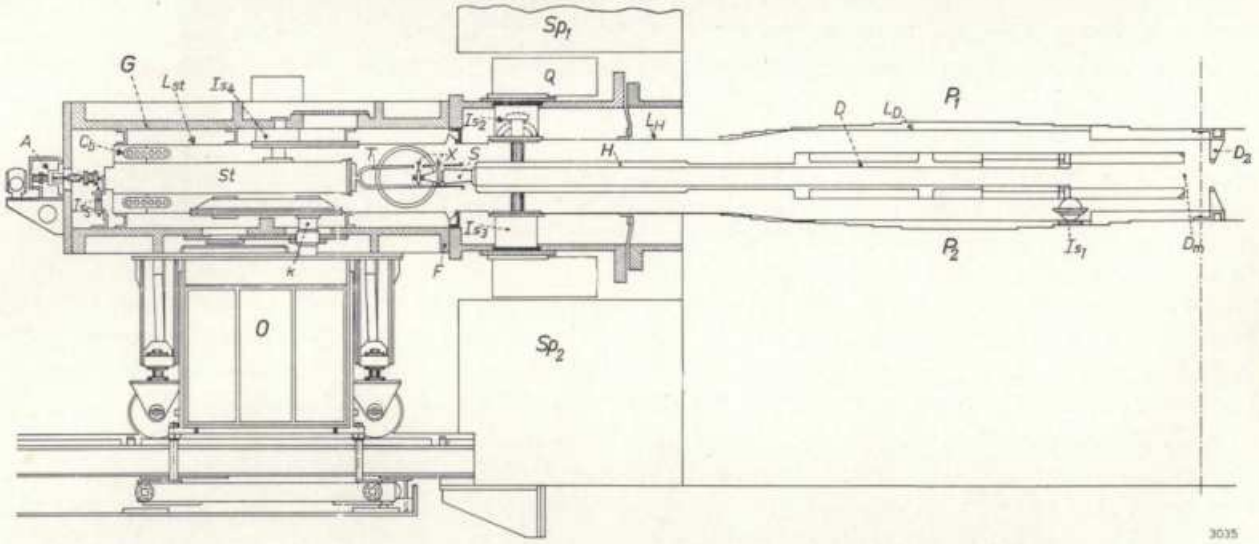


Fig. 14. Lengtedoorsnede van het hoogfrequentiesysteem. Dee D en Dee-hals H zijn als één geheel geconstrueerd. D_m Dee-mond. D_2 dummy-Dee. P_1 en P_2 poolplaten met shimringen van de cyclotronmagneet, tevens deksel en bodem van de versnellingskamer. Is_1 bolisolatoren. Is_2 en Is_3 doorleidingsisolatoren voor de Dee-hals. S stator en T stemvork van de modulator, met tasters X. St stub, die in de stubdoos G aan de isolatoren Is_4 hangt en is bevestigd met de isolator Is_5. C_b kortsluitcondensator. A servomechanismes voor het instellen van de ophanging van de stemvork. F flens, waarmee de stubdoos via een tussenstuk bevestigd is aan de versnellingskamer. L_D-L_H-L_{St} buitengeleider van het coaxiale resonatorsysteem. k aansluiting van de oscillator. O oscillatorhuis. Q kamer waarin de koelwaterslangen zijn opgeborgen. Sp_1 en Sp_2 bekrachtigingsspoelen van de cyclotronmagneet.

niet gebruikt, maar hun constructie heeft het voordeel dat de ophanging een grote bewegingsvrijheid toestaat, hetgeen in ons geval van belang is om de aanvankelijke justering van de stemvork te vergemakkelijken. Het zwaartepunt van de gehele stub ligt vrijwel loodrecht onder de verbindingslijn van de ophangpunten, zodat ten naaste bij geen buigende momenten op de isolatoren werken. Als aanvullende ondersteuning is het kortgesloten einde van de stub nog bevestigd aan de bodem van de doos, en wel via een eenvoudige isolator Is_5, aangezien dit einde voor gelijkspanning geïsoleerd moet blijven van aarde (zie hieronder). De stub en de voet van de stemvork (zie fig. 22 van artikel III) worden met water gekoeld, de X en het met servomotoren A werkende ophangmechanisme voortdurend wordt gecorrigeerd (zie III, blz. 185). Ter vergemakkelijking van montage en demontage bevindt zich onder de stubdoos een tafel met rollen die op rails neergelaten kunnen worden; na losmaken van de genoemde flensverbinding komt de stubdoos op deze tafel te rusten en kan worden weggerold.

Nog enkele opmerkingen over de uit koperen platen samengestelde buitengeleider van de resonator. Het gedeelte dat de Dee omgeeft („Dee-liner", L_D), alsmede de tegen-Dee of dummy-Dee D_2 zijn geleidend verbonden met de poolplaten P_1 en P_2 en rechtstreeks hierop vastgemaakt. Het gedeelte L_H rondom de Dee-hals heeft hiervan onge-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

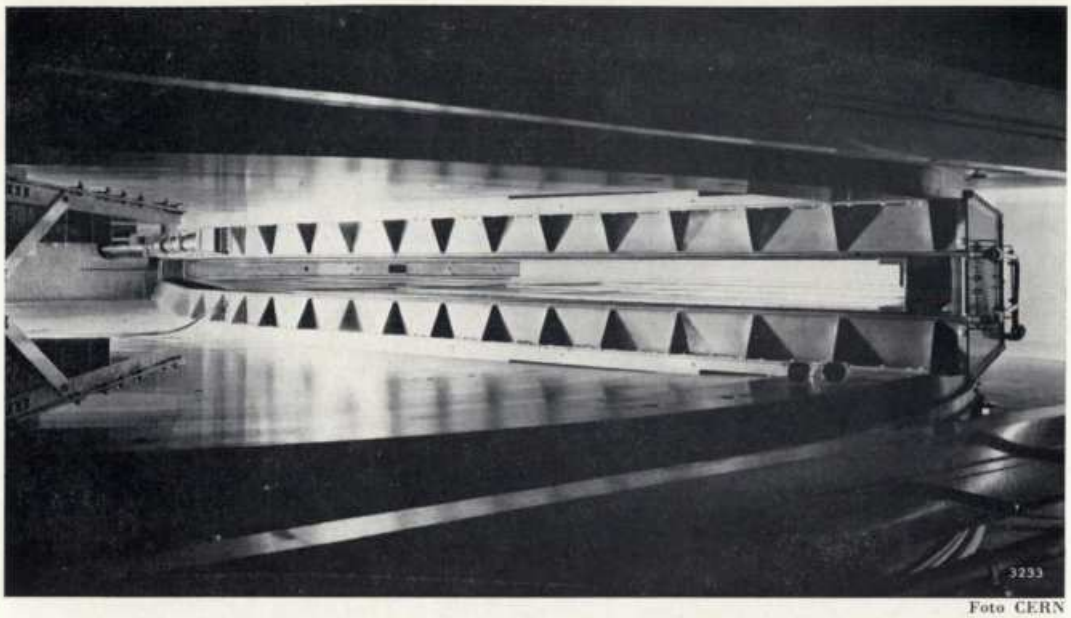


Foto CERN

Fig. 15. De Dee, gemonteerd tussen de poolplaten. Men ziet de betrekkelijk nauwe Dee-mond. Om minder zware eisen aan de stabiliteit van de banen der deeltjes in verticale richting te hoeven stellen, zou men de Dee-mond wel wijder willen maken. Dit is echter niet gedaan, vooral met het oog op de gewenste kleine Dee-capaciteit, die een grote afstand tussen de Dee-platen en de geaarde buitengeleider van het Dee-systeem vereist. Van links achter ziet men de pijp waaraan de ionenbron wordt bevestigd, in de versnellingskamer steken.

veer dezelfde afstand als ter plaatse van de overgang van Dee tot Dee-hals. De zijwanden van deze delen van de buitengeleider worden gevormd door geperforeerde koperen platen. De buitengeleider L_{St} van de stub wordt gedragen door balken van profielstaal, die tegen de binnenkant van de stubdoos zijn geschroefd.

De stub kan aan het kortsluiteinde niet galvanisch, doch alleen capacitief met zijn buitengeleider worden kortgesloten. Ter vermijding van glimontladingen moeten nl. zowel aan de Dee en Dee-hals alsook aan de stub gelijkspanningen van ongeveer 1000 V worden gelegd. De capaciteit van de kortsluitcondensator (C_b in fig. 14) dient zo groot mogelijk, en zijn zelfinductie zo klein mogelijk te zijn. Dit schijnbaar nogal eenvoudige schakelelement veroorzaakte bij de constructie nog vrij grote moeilijkheden (zie ook aan het einde van dit artikel). Voor de uitvoering ervan werden in de handel verkrijgbare keramische schijfcondensatoren van 1000 pF gebruikt, waarbij telkens 126 schijfjes tot één groep zijn verenigd (*fig. 16*). De condensator bestaat uit in totaal 20 van deze groepen en heeft een capaciteit van 2,52 μF. De door de verliezen in de condensator ontwikkelde warmte wordt met koelwater afgevoerd. De tijdens het werken maximaal toelaatbare gelijkspanning bedraagt 1500 V.

In fig. 14 ziet men ook de aftakking k van de stub voor de hoogfrequentievoeding. Deze aftakking is zo uitgevoerd dat ze voor de aanvankelijke instelling enigszins in de lengterichting van de resonator kan worden verschoven, als men enkele buiten de stubdoos toegankelijke schroeven losmaakt. De hoogfrequentiegenerator met de zendbuis bevindt zich in een huis O, dat aan de bodem van de stubdoos is vastgeschroefd en dat voor het verwisselen van de buis neergelaten en naar buiten gerold kan worden.

De hoogfrequentiegenerator

De hoogfrequente spanning voor de excitatie van de resonator wordt geleverd door een triode-oscil-

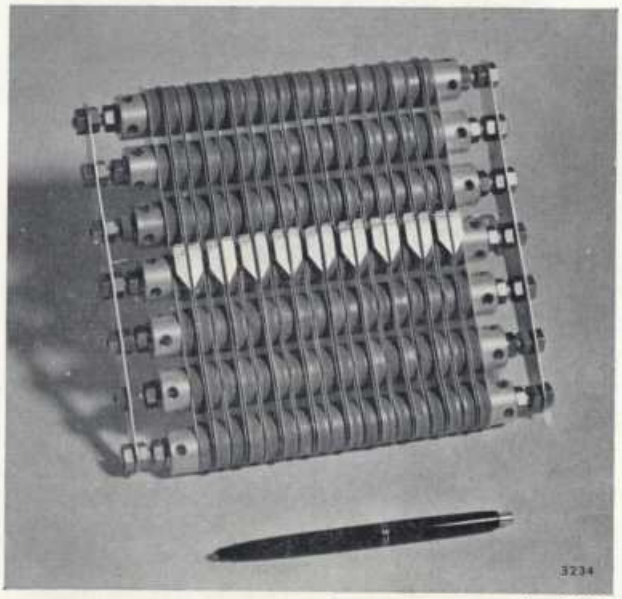


Foto CERN

Fig. 16. Een van de 20 groepen van schijfcondensatoren waaruit de kortsluitcondensator C_b is opgebouwd.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

lator, die een met water gekoelde triode TBW 12/100 bevat [6]). Zelfs als men rekening houdt met alle mogelijke verliezen (zie blz. 159), is de vermogensreserve van deze 100-kW-buis zeer aanzienlijk. De buis is zeer geschikt om in een roosterbasisschakeling te worden gebruikt, zoals hieronder nog nader wordt beschreven.

De schakeling en uitvoering van de oscillator wijken enigszins van de gebruikelijke af, met het oog op het grote variatiegebied van de frequentie van de resonator. De oscillator moet in dit gehele gebied stabiel kunnen oscilleren (en liefst alléén in dit gebied, ten einde de excitatie van eventuele parasieten te vermijden). Uit proeven met het model op schaal 1 : 1 was gebleken dat dit met de conventionele terugkoppelschakeling, die voor synchrocyclotrons meestal wordt toegepast en die in *fig. 17* is voorgesteld, in ons geval niet kon worden gerealiseerd. Dit is vooral daaraan te wijten dat de oscillator trillingen kan opwekken in de lus die gevormd wordt door de relatief lange toevoerleidingen naar de twee aansluitpunten van de resonator. Bovendien is het bij deze schakeling moeilijk in het gehele frequentiegebied een geschikte faze van de terugkoppelspanning te verkrijgen: het fazeverschil tussen anode- en katodewisselspanning, dat in het ideale geval nul moet zijn, wordt bij de uiterste frequenties zo groot dat men daarbij niet meer aan de oscillatievoorwaarde voor deze schakeling kan voldoen.

Zeer geschikt bleek daarentegen de schakeling volgens *fig. 18*. Hier vindt de excitatie van de oscillator plaats door een terugkoppelspanning die wordt afgenomen van een zelfinductie L in de anodekring, waarbij echter de resonator, die slechts in één punt is aangesloten, toch de frequentie bepaalt. Dit is te danken aan het grote door de resonator opgenomen reactieve vermogen (de kwaliteitsfactor is bijzonder groot, > 2000): de resonator fungeert hier als het ware als vliegwiel, en we spreken daarom ook van vliegwielschakeling. Dat in dit geval de resonator slechts op één punt behoeft te worden aangesloten, is ook uit een oogpunt van constructie voordelig, aangezien men dan slechts één hoogvacuümdoorleiding voor een hoogfrequente stroom nodig heeft. Bovendien kan de terugkoppelfactor nu worden ingesteld door verschuiven van de aftakking a in het oscillatorhuis, dus buiten de vacuümtank, en men kan de variatie van de terugkoppelfactor met de frequentie beïnvloeden door toevoeging van schakelelementen in de gemakkelijk toegankelijke terugkoppelketen. Aangezien de roosterbasisschakeling bij doeltreffende uitvoering een goede inwendige ontkoppeling van anode en katode waarborgt, wordt de terugkoppeling uitsluitend bepaald door de schakelelementen die zich buiten de buis bevinden.

Deze oplossing is zo doelmatig gebleken, vooral ter vermijding van parasieten, dat ze naderhand door Philips ook is overgenomen voor het 150-MeV-cyclotron te Parijs.

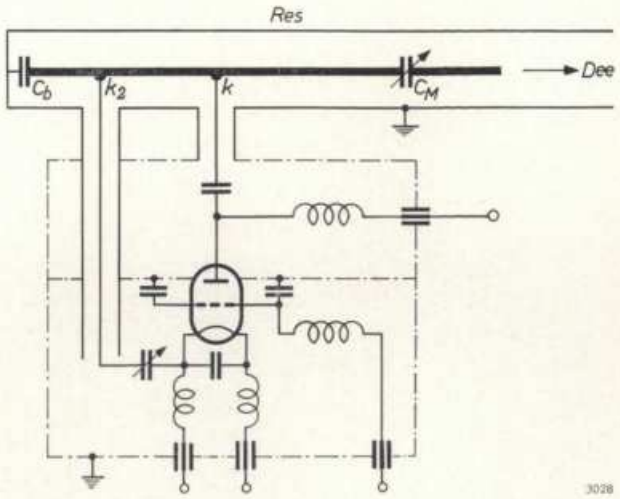


Fig. 17. Oscillator met conventionele terugkoppelschakeling, zoals gewoonlijk bij synchrocyclotrons wordt toegepast. De anode is in k op de resonator *Res* aangesloten. Doordat de terugkoppelspanning in dit geval van een tweede aftakking k_2 van de resonator wordt afgenomen, ontstaat een lus waarin gemakkelijk ongewenste trillingen kunnen worden opgewekt. (Wat de overige details betreft, beantwoordt de schakeling aan die van fig. 18.)

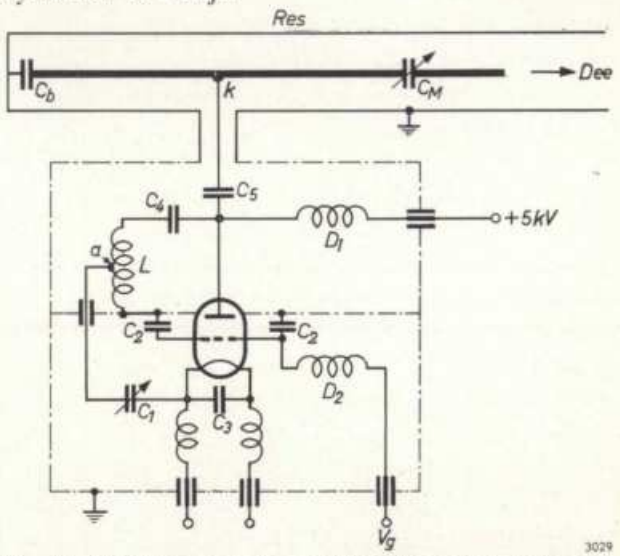


Fig. 18. Oscillator met vliegwielschakeling. De terugkoppelspanning wordt afgetakt in een punt a van de zelfinductie L, terwijl de resonator *Res*, die slechts in één enkel punt k is aangesloten, ten gevolge van zijn groot reactief vermogen de frequentie bepaalt. De schadelijke zelfinducties van de buis en van de toevoerleidingen compenseert men met de op afstand instelbare condensator C_1; men zorgt ervoor dat de anode- en de katodewisselspanning precies in faze zijn bij een frequentie juist in het midden van de frequentiezwaai die de resonator maakt. C_2 aardingscondensator voor het rooster van de buis. C_3 overbrugging van de gloeidraad. C_4 en C_5 scheidingscondensatoren voor de anodegelijkspanning. D_1 en D_2 smoorspoelen.

[6]) Deze buis is beschreven in Philips techn. T. **14**, 197, 1952.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Opdat de anodeketen, die in fig. 18 bestaat uit de zelfinductie L met de parallel daarop aangesloten resonator, werkelijk een trillingskring vormt, moet de resonator bij de optredende trilling een capacitieve reactantie hebben De frequentie die de oscillator krijgt, ligt derhalve telkens iets boven de eigen frequentie van de vrije resonator. Het verschil is echter slechts heel klein, dank zij de hoge kwaliteit van de resonator.

De zelfinducties van de buis en van de toevoerleidingen hebben de tendentie fazeverschillen te veroorzaken tussen anode- en katodewisselspanning, die theoretisch immers in faze moeten zijn. Men compenseert deze zelfinducties met behulp van de condensator C_1, die bestaat uit twee parallel geschakelde instelbare vacuümcondensatoren. De compensatie kan natuurlijk slechts voor één bepaalde frequentie volkomen goed zijn. Tijdens het werken van het cyclotron zorgt men ervoor dat deze frequentie in het midden van het modulatiegebied ligt. Eén van de vacuümcondensatoren kan te dien einde worden ingesteld vanuit de bedieningszaal, die op 60 meter afstand van het cyclotron ligt (zie I). De fazeafwijking aan beide einden van het gebied is betrekkelijk klein, dank zij de relatief geringe kwaliteitsfactor van het katodegedeelte van de terugkoppelketen (deze heeft hier immers geen frequentiebepalende taak).

We vermelden nog enige bijzonderheden van de constructie. De constructie van de buis TBW 12/100 maakt een behoorlijke scheiding tussen katode- en anoderuimte van de oscillator mogelijk, zoals voor de roosterbasisschakeling gewenst is. Het oscillatorhuis is daarvoor door een horizontaal schot ter hoogte van de roosteraansluiting van de buis in tweeën gedeeld. Op het schot liggen op een cirkel rondom de buis 96 keramische schijfcondensatoren van ieder 1000 pF, die een zeer goede hoogfrequente aarding van het rooster teweegbrengen (C_2 in fig. 18). Resonanties van deze condensator in het gebied tussen 16 en 29 MHz konden worden vermeden. Dezelfde soort condensatoren worden gebruikt voor de overbrugging van de gloeidraad (C_3). Voor de zelfinductie L in de anodeketen en de smoorspoel D_1 in de toevoer van de anodegelijkspanning worden spoelen gebruikt die bestaan uit pijpen, waardoorheen ter koeling een luchtstroom wordt geleid. In de aansluiting van de anode op de resonator is ter gelijkspanningsscheiding een keramische potcondensator C_5 opgenomen. De leiding voor de aansluiting is zo kort mogelijk gehouden, en ook de zelfinductie van de condensatoraansluitingen is door een speciale uitvoering zeer klein gemaakt, zodat de hoogfrequente oscillatorspanning met zo gering mogelijke verzwakking aan de resonator wordt toegevoerd.

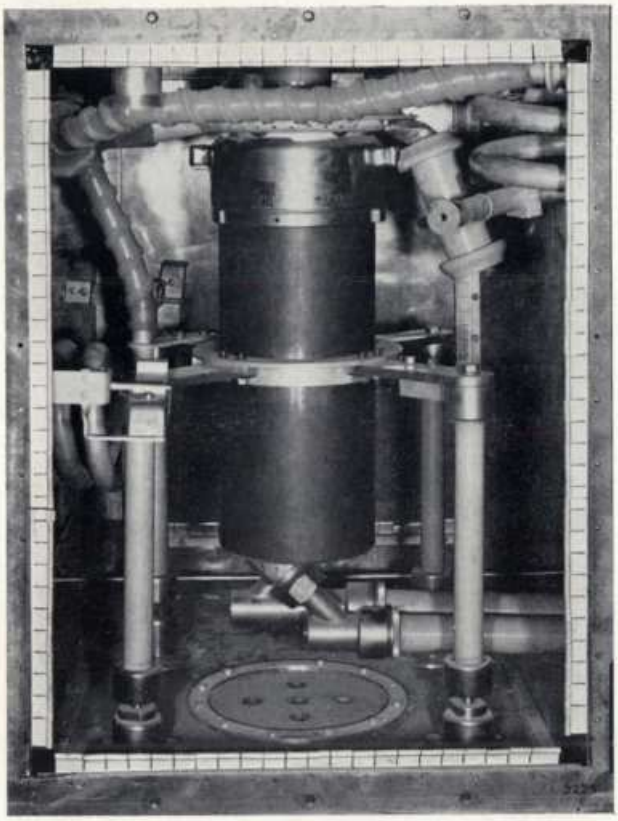


Foto CERN

Fig. 19. Kijkje in het inwendige van het generatorhuis. In het midden de anodekan met koelmantel, rechts boven de, uit drie windingen bestaande, terugkoppelspoel, links een der smoorspoelen.

Behalve de gebruikelijke elektrische afscherming met koperblik heeft het generatorhuis, ter bescherming van de zendbuis tegen het spreidingsveld van de cyclotronmagneet (dat de steilheid benadeelt), nog een uitwendige stalen mantel. Om dezelfde reden is de anodekan nog door een 10 millimeter dikke ijzeren buis omgeven. Het koelwater wordt ter isolatie tegen aarde weer door een ca. 10 m lange dubbele slang van polyvinylchloride geleid.

Fig. 19 toont het inwendige van het oscillatorhuis, waarin enkele van de genoemde onderdelen te zien zijn. In *tabel I* zijn de gegevens voor de normale werking van de oscillator bijeengebracht.

Tabel I. Gegevens van de oscillator voor de normale werking met impulsen.

Anodegelijkspanning	5-6 kV
Anodestroom (gemiddelde waarde)	3-4 A
Roosterstroom (gemiddelde waarde)	1-1,5 A
Inschakelduur	60-70%
Frequentiezwaai	16,5-29 MHz
Anoderendement	59-62%

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Hulpinrichtingen van de hoogfrequentie-installatie

Tot de hoogfrequentie-installatie behoren nog een voedingsapparatuur, een installatie voor de koeling van het koelwater, een inrichting om het cyclotron impulsgewijze te doen werken, en inrichtingen voor besturing en controle. Deze onderdelen, die vrijwel alle min of meer conventioneel van uitvoering zijn, heeft men gescheiden van het cyclotron ondergebracht in de hal waarin zich ook het omzetteraggregaat voor de bekrachtiging van de grote magneet bevindt (*fig. 20*; zie *El* in fig. 3 van I). Bediening en controle van de hoogfrequentie-installatie kunnen goeddeels ook van hier in plaats vanaf de hoofdbedieningszaal (fig. 5 in I) geschieden. De bedieningsorganen van de besturing zijn dusdanig vergrendeld dat een beschadiging van de installatie door schakelen in verkeerde volgorde niet mogelijk is. De realisatie van de belangrijkste schakelhandelingen kan op panelen in de hoofdbedieningszaal en in de omzetterhal *El* worden gecontroleerd. Deze handelingen slaan o.a. op het in- en uitschakelen van de gloeistromen voor de hoogspanningsgelijkrichter en voor de zendbuis; op het in- en uitschakelen van de anodespanning van de buis; op het omhoog- of omlaagregelen van deze spanning alsook van de gelijkspanningen voor de Dee en voor de stub; op het in- en uitschakelen van de stemvorkmodulator en op het omhoog- of omlaagregelen van zijn amplitude. De apparatuur is verder in hoge mate beveiligd: alle belangrijke storingen worden individueel gesignaleerd en bij gevaarlijke storingen wordt het desbetreffende gedeelte van de installatie automatisch uitgeschakeld.

Het zojuist genoemde impulsgewijze doen werken van het cyclotron heeft ten doel een onnodige thermische belasting te vermijden, in het bijzonder van de modulator: de oscillator dient slechts te werken gedurende dat gedeelte van de modulatieperiode waarin deeltjes kunnen worden versneld. De zender wordt te dien einde bestuurd door impulsen op het rooster. De vereiste schakelimpulsen worden door de stemvork zelf geleverd (III, fig. 25). De vrij omvangrijke apparatuur die nodig is voor het impulsgewijze doen werken en voor de synchronisatie met de stemvork dan wel met van buiten afkomstige impulsen (b.v. bij proeven met het bellenvat), zullen we hier niet nader bespreken.

Bij het werken van het cyclotron heeft de hoogfrequentie-installatie geen noemenswaardige moei-

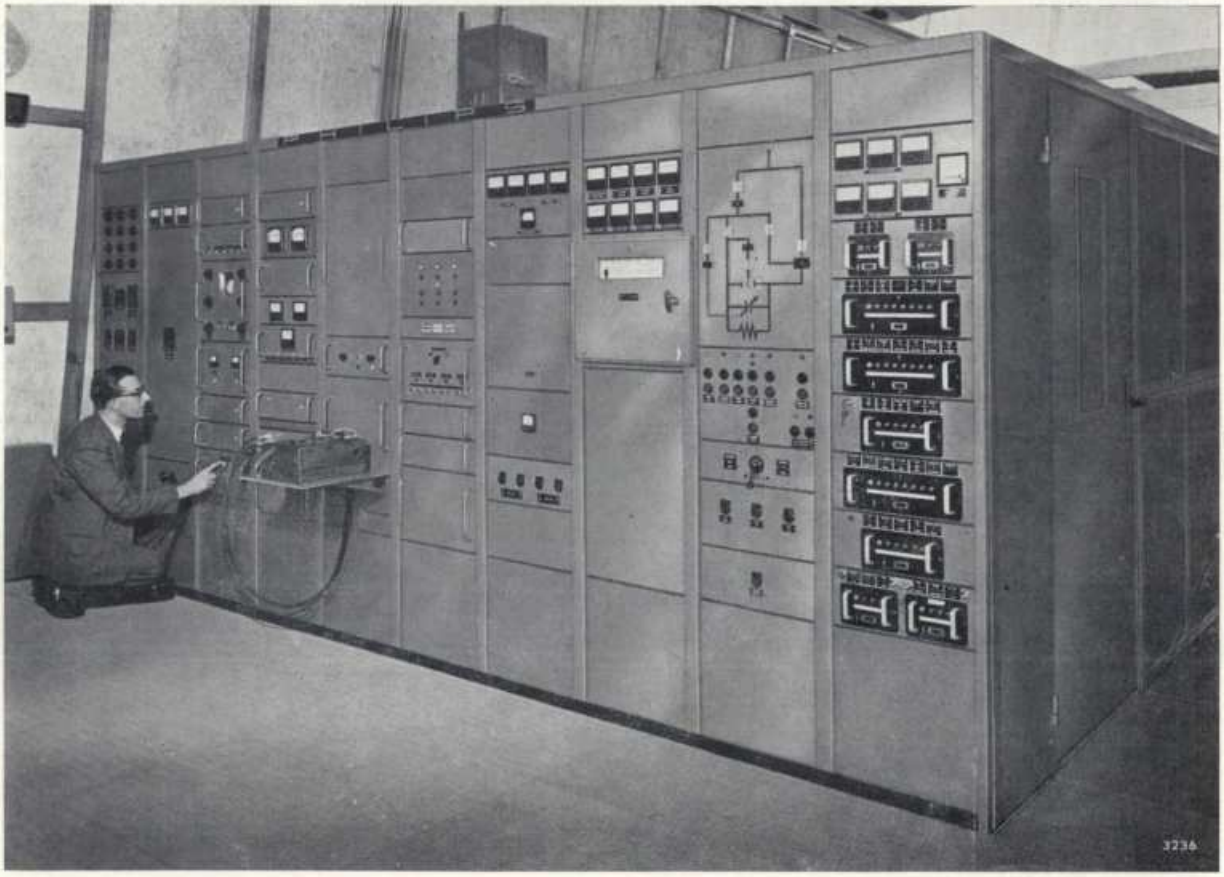


Foto CERN

Fig. 20. Gedeelte van de besturings- en controle-inrichtingen van de hoogfrequentie-installatie.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

lijkheden veroorzaakt. Soms treden bij bepaalde frequenties deuken in het amplitudeverloop van de Dee-spanning op, en ter compensatie hiervan moet dan de anodespanning wat hoger dan normaal worden gekozen (6 kV). Reeds spoedig is ontdekt dat deze deuken te wijten zijn aan resonantiefrequenties van de kortsluitcondensator van de stub (C_b in fig. 14). Daar de eigenschappen van het keramische diëlektricum van deze condensator nogal afhangen van de temperatuur, zijn het optreden en de ligging van de deuken sterk afhankelijk van de tijd gedurende welke men het cyclotron heeft laten werken en van de koelingsomstandigheden van de condensator. Hierdoor kon tegen de deuken niet veel worden gedaan. Thans, nu het protonsynchrotron van de CERN in werking gekomen is en het synchrocyclotron voor het eerst een tijdlang buiten werking mocht worden gesteld, heeft men de oorspronkelijke kortsluitcondensator vervangen door een andere, eveneens keramische, condensator, die speciaal voor dit doel is geconstrueerd en die uit slechts enkele grote platen bestaat.

Samenvatting. De door Philips Eindhoven in samenwerking met de CERN ontwikkelde en uitgevoerde hoogfrequentie-installatie van het CERN-synchrocyclotron bevat twee hoofdonderdelen, die hier in het kort worden beschreven: de resonator en de hoogfrequentiegenerator, met een omvangrijke hulpapparatuur. Uit de gewenste protonenenergie van 600 MeV volgt bij gegeven radiaal verloop van het magneetveld in het cyclotron een bepaald frequentieprogramma: men moet de zeer grote frequentiezwaai van 29 tot 16,5 MHz realiseren. De voor deze modulatie gebruikte stemvorkcondensator levert een capaciteitsvariatie tussen 256 en 2580 pF. Door deze condensator met een zelfinductie (de „stub") aan te vullen tot een serieresonantiekring, is het gelukt een Dee-systeem samen te stellen waarvan de resonantiefrequentie tussen de genoemde frequentiegrenzen varieert. Hiervoor worden enkele theoretische beschouwingen weergegeven, en de dimensionering van het Dee-systeem, waarbij drie verschillende modellen werden gebruikt, wordt nader beschreven. Voor de hoogste en voor de laagste frequentie worden de bij voeding met constante hoogfrequente spanningsamplitude verkregen spannings- en stroomverdelingen op de resonator weergegeven. De spanningsamplitude aan de Dee-mond blijkt tijdens de gehele modulatieperiode aanzienlijk groter te zijn dan volgens het „ideale" (bij een faze $\varphi = -30°$ van de te versnellen deeltjes behorende) amplitudeprogramma. Hierna volgt een beschrijving van de constructie van het gehele resonatorsysteem, waarbij o.a. de maatregelen worden vermeld die werden genomen ter vermijding van mechanische spanningen bij de optredende vervormingen. Voor de oscillator is een bij cyclotrons nog niet eerder toegepaste schakeling gekozen, de zg. vliegwielschakeling, waarbij de stuurspanning voor de zendbuis (een met water gekoelde 100-kW-triode TBW 12/100) aan een eigen terugkoppelketen wordt ontleend terwijl toch de resonator, die in slechts één punt is aangesloten, ten gevolge van zijn groot reactief vermogen de frequentie bepaalt. Gebleken is dat bij deze schakeling de parasieten (ongewenste trillingsvormen van het hoogfrequentiesysteem), waarvan de bestrijding bij andere cyclotrons reeds vaak veel moeite heeft gekost, vrijwel geen last veroorzaken. Ook de uitvoering van de oscillator wordt in het kort beschreven. De hulpapparatuur, waaronder de inrichting voor het impulsgewijze doen werken van het cyclotron, wordt slechts aangestipt.

III. DE STEMVORK-MODULATOR

door B. BOLLÉE en F. KRIENEN *).

621.376.32:621.384.611.2

De modulator van het hoogfrequentiesysteem van het CERN-synchrocyclotron heeft tot taak de frequentie van dit systeem periodiek te doen zwaaien (55 maal per seconde) van ca. 29 tot 16,5 MHz (golflengte 10,3 tot 18,2 meter). Gewoonlijk bewerkstelligt men bij een synchrocyclotron de frequentiemodulatie met behulp van een roterende condensator. De hoogfrequente spanning die daarbij op de kussenblokken en op de vacuümdichte doorvoering van de rotatie-as komt te staan, kan echter aanzienlijke moeilijkheden veroorzaken. Een andere methode berust op het gebruik van een variërende zelfinductie: een spoel met een ferrietkern, waarvan de permeabiliteit gevarieerd wordt door middel van een hulpwikkeling waardoor men een periodiek veranderlijke voormagnetisatiestroom stuurt. Voor het onderhavige geval was te voorzien dat deze methode zou stranden op de magnetische verliezen in het ferriet. Deze overwegingen leidden ertoe, voor de CERN-machine een nieuwe, in synchrocyclotrons nog weinig toegepaste methode van frequentievariatie te beproeven, nl. door een trillende condensator [1]). De ontwikkeling hiervan werd reeds in 1952, dus nog vóór de officiële oprichting van de CERN, aan het Philipslaboratorium te Eindhoven opgedragen.

Er zal hier eerst een globale beschrijving worden gegeven van het systeem zoals dit na langdurige voorbereidende proeven is uitgevoerd. Na overwinning van allerlei moeilijkheden zijn hiermee ten slotte zeer goede resultaten verkregen. Nader worden vervolgens besproken de vormgeving, de aandrijving en de koeling van het trillende systeem, alsook een aantal bijkomende problemen.

*) CERN, Genève.

[1]) Het 740-MeV-synchrocyclotron te Berkeley in Californië, het grootste ter wereld, werkt eveneens met een trilcondensator, die echter anders is uitgevoerd dan die van de CERN-machine (nl. met vibrerende tongen). Zie R. L. Thornton, CERN Sympos. 1956[1], blz. 413; B. H. Smith, K. R. Mackenzie, J. Reidel e.a., Wescon Conv. Rec. I.R.E. **1**, 60, 1957.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Globale beschrijving van de trilcondensator

De variërende capaciteit van de modulator wordt verwezenlijkt met behulp van een triller in de vorm van een stemvork, waarvan de benen om een vast opgestelde stator heen grijpen: zie *fig. 1*.

Tussen de benen van de stemvork en de stator komt een elektrische spanning van 10 tot 20 kV te staan. Met het oog op het gevaar van overslag was het gewenst de onderlinge afstand tussen benen en stator niet kleiner dan 1,5 mm te kiezen. Om een ongeveer de maximale breedte die de beschikbare ruimte tussen de beide vacuümpompen van de versnellingskamer toeliet (zie deel I, fig. 7). De stator, waar deze bladen over een lengte van 10 cm omheen grijpen, is een 2 m lange aluminium profielbalk, welke tegen de steel of „hals" van de Dee is geschroefd. We vermelden hier meteen de begrenzing voor de overige afmetingen van de stemvork: de hoogte werd door de hoogte van de vacuümkamer beperkt tot ca. 20 cm, de lengte kon in verband met

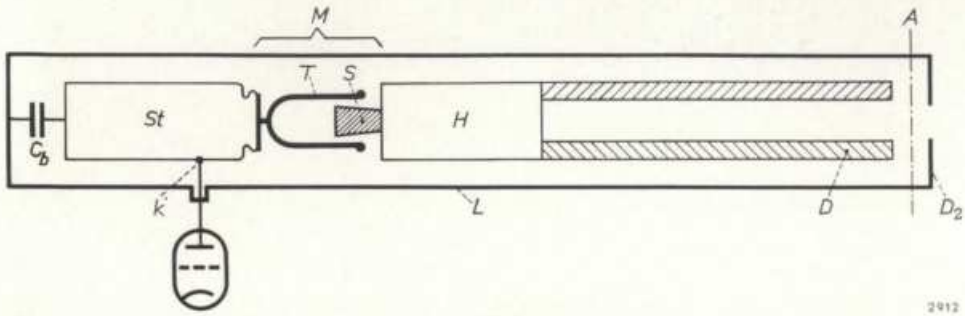


Fig. 1. Het hoogfrequentiesysteem van het CERN-synchrocyclotron, dat op te vatten is als een coaxiale lecherleiding. *A* hartlijn van het cyclotron (plaats van de ionenbron). *D* Dee. D_2 dummy-Dee (geaard). *H* steel of hals van de Dee. *M* modulator, met stemvork *T* en stator *S*. *St* „stub" (eindstuk van het lechersysteem). *L* buitengeleider van het lechersysteem. *k* koppeling aan anode van zendbuis. C_b kortsluitcondensator, die het mogelijk maakt de stub op een gelijkspanning ten opzichte van aarde te brengen (zie II, blz. 166).

voldoend grote maximumwaarde van de capaciteit te krijgen, moesten derhalve de benen van de stemvork zeer breed worden gemaakt. Dit was ook om andere redenen gewenst: de dichtheid van de hoogfrequente stroom over de benen moest klein genoeg blijven om de daardoor ontwikkelde warmte goed te kunnen afvoeren. De benen, of zoals we nu beter kunnen zeggen: de bladen van de stemvork hebben derhalve een breedte van 2 meter, d.i. de vereiste totale lengte van het hoogfrequentiesysteem en de gunstigste plaats voor koppeling aan de anode van de zendbuis (zie deel II, blz. 163), niet groter dan ca. 60 cm gemaakt worden.

De stemvork is met een korte steel op een voet bevestigd. Hij is vervaardigd uit een massief blok aluminium, met een nauwkeurigheid van $^1/_{10}$ mm. Het gewicht ervan bedraagt ca. 75 kg, de eigen frequentie is 55 Hz. In *fig. 2* zijn de vorm en afmetin-

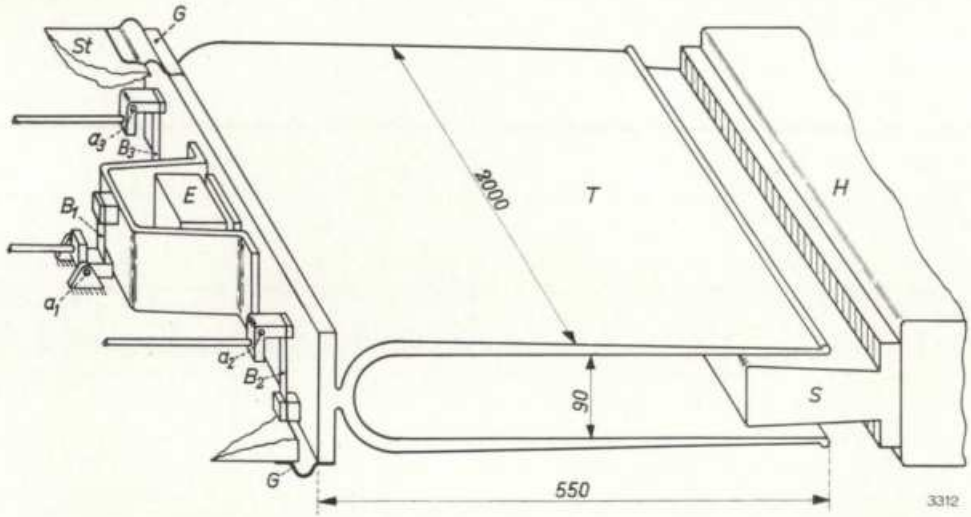


Fig. 2. Perspectivische schets van stemvork *T* en stator *S*. *H* Dee-hals. *E* aandrijfmechanisme. B_1, B_2, B_3 drie stalen banden waaraan de stemvork is opgehangen. a_1, a_2, a_3 in het stubfreem gelegerde asjes. *G* bladveren van berylliumbrons, aangebracht over de hele breedte van de stemvork, voor de elektrische verbinding van de stemvork met de stub *St*.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

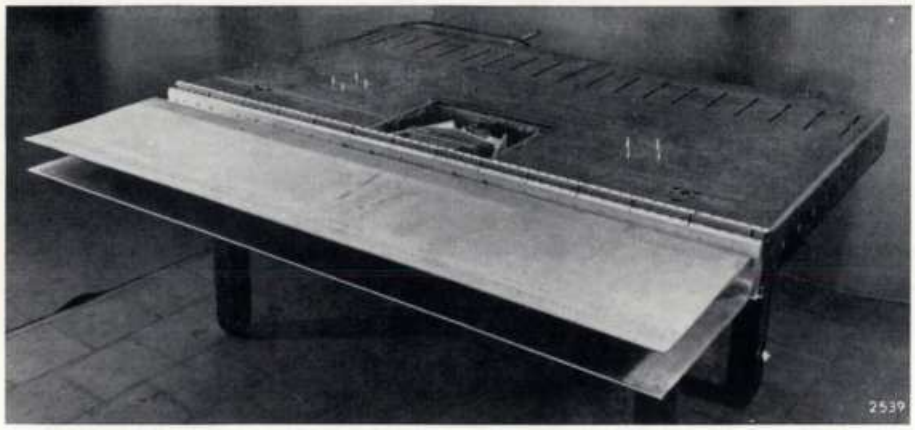


Fig. 3. De stemvork, geplaatst tegen de stub.

gen van de stemvork nader aangegeven, *fig. 3* toont er een foto van.

In fig. 2 is ook geschetst hoe de stemvork in trilling wordt gebracht. Hiertoe dient een elektromechanische omzetter, bevestigd tegen de voet. De werking berust op een omkering van het bekende verschijnsel dat een aangeslagen stemvork die men op een klankbodem zet, hieraan energie afgeeft (en daardoor beter hoorbaar wordt): brengt men de klankbodem op andere wijze in trilling, met de juiste frequentie, dan wordt energie in omgekeerde richting getransporteerd en de benen van de stemvork komen in trilling. Bij onze stemvork moet men aan de voet — die hier als het ware dienst doet als klankbodem — een horizontale amplitude van ongeveer 0,15 mm geven, opdat de bladen de gewenste beweging uitvoeren (12,5 mm amplitude van elk der uiteinden, of „lippen"). De stemvork is aan dunne stalen banden opgehangen (B_1, B_2, B_3 in fig. 2), zodat de horizontale beweging vrijwel niet wordt belemmerd. De elektrische verbinding met de stub (het eindstuk van het hoogfrequentiesysteem, *St* in fig. 1) wordt gevormd door gebogen bladveren (*G*) van berylliumbrons. Via de banden en bladveren wordt slechts uiterst weinig trillingsenergie overgebracht op de stub en zijn ondersteuningsisolatoren. De grote amplitude van de bladen van de stemvork wordt geïllustreerd door de foto *fig. 4*.

Bezien we nu de eigenschappen van de stemvork als condensator. In de „gesloten" stand is de binnenkant van de bladen evenwijdig met het statoroppervlak, met een afstand δ van 1,5 mm. De capaciteit is dan 2580 pF. In de „geopende" stand is de afstand, gemeten ter plaatse van de lip, $\delta = 26{,}5$ mm en de capaciteit 256 pF. Men ziet uit deze getallen dat de relatieve capaciteitsvariatie (ca. 1 : 10) aanzienlijk kleiner is dan de relatieve afstandsvariatie (ca. 1 : 18). Dit komt door de niet-evenwijdige beweging en door de veranderende spreiding van het elektrische veld. Het beeld van de elektrische krachtlijnen en equipotentiaalvlakken, waaruit men de capaciteit kan bepalen [2]), maakt dit duidelijk; zie *fig. 5a* en *b*.

Voor een goede werking van het synchrocyclotron moet de oscillatiefrequentie f van het hoogfrequentiesysteem telkens volgens een zekere tijdsfunctie dalen van de maximale tot de minimale waarde (zie II). De mechanische trilling van de stemvork, d.w.z. de variatie van de afstand δ tussen de bladen en de stator als functie van de tijd, is sinusvormig. Het verloop van de capaciteit C als functie van δ — tussen de beide genoemde extreme waarden — wordt gegeven door *fig. 6a*. De variatie van de oscillatiefrequentie f als functie van C is bekend

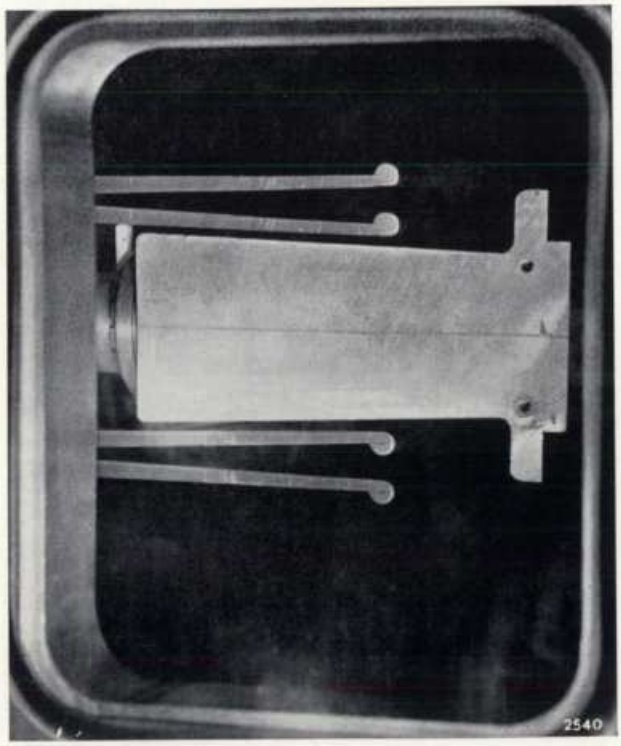


Fig. 4. Stator van de modulator met de hier omheen grijpende bladen van de trillende stemvork, stroboscopisch opgenomen met 110 lichtflitsen per seconde. Elk blad is daardoor in zijn beide uiterste posities afgebeeld („gesloten" en „open" stand van de stemvork). Men ziet de buitengewoon grote amplitude der bladen.

[2]) E. Weber, Electromagnetic fields, theory and applications, I. Mapping of fields, Wiley, New York 1950.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

(fig. 6*b*) uit berekeningen en uit metingen aan modellen van het hoogfrequentiesysteem, waarbij de trilcondensator vervangen was door een instelbare platencondensator. Uit deze drie verbanden kan langs grafische weg het verkregen verloop van f als functie van de tijd geconstrueerd worden. Dit verloop is weergegeven in fig. 6*c*.

Constructies met dusdanig grote afmetingen als dit cyclotron zijn tijdens het werken altijd onderhevig aan merkbare vormveranderingen ten gevolge van temperatuur- en drukvariaties, magnetische krachten, elastische nawerking van

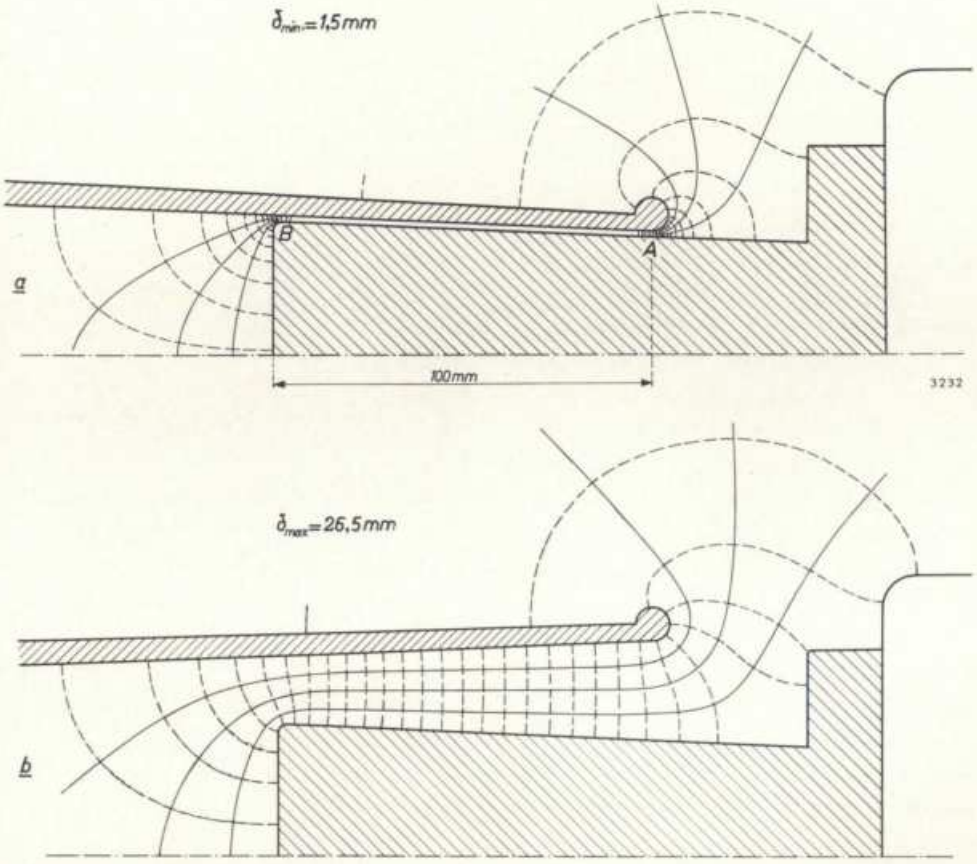


Fig. 5. Krachtlijnen (gestippeld) en doorsneden van equipotentiaalvlakken (getrokken) van het elektrische veld tussen de stator en een der bladen van de stemvork, *a*) in de gesloten stand, *b*) in de open stand. In (*b*) zijn de elektrodeoppervlakken niet evenwijdig.

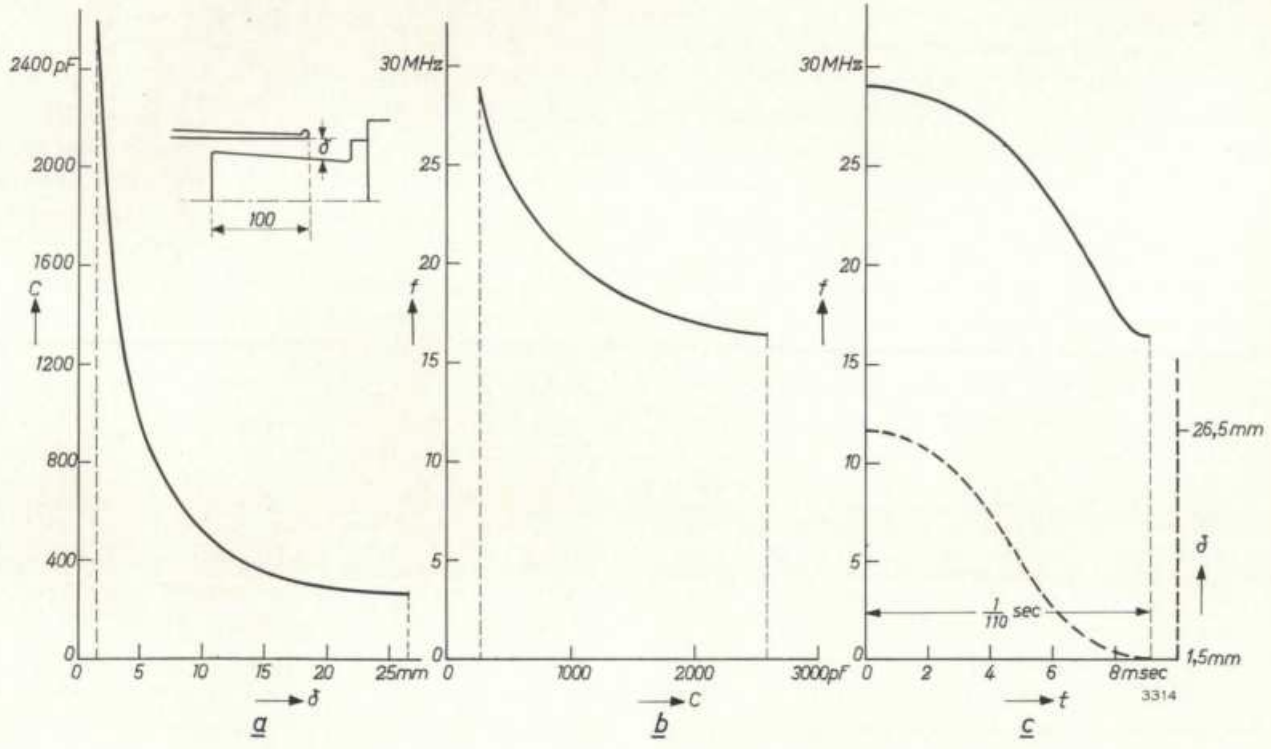


Fig. 6. *a*) Capaciteit C van de trilcondensator, als functie van de afstand δ tussen de bladen en de stator.
b) Oscillatiefrequentie f van het hoogfrequentiesysteem als functie van C.
c) Verloop van de oscillatiefrequentie f met de tijd t, gedurende één modulatieperiode. Dit verband is afgeleid uit (*a*) en (*b*), bij sinusvormig verloop van δ met de tijd (gestippeld).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

vacuümdichtingen, enz. Deze vormveranderingen doen hun invloed gelden op de onderlinge positie van stator en stemvork. Ook de trillingsamplitude van de stemvork is onderhevig aan allerlei wisselende invloeden, zoals de elektrostatische aantrekkingskrachten tussen stemvork en stator en de demping door wervelstromen, die in de bewegende bladen worden geïnduceerd door het spreidingsveld van de cyclotronmagneet. Veranderingen in deze factoren zijn onvermijdelijk, daar men zowel het magneetveld als de inschakelduur en grootte van de hoogfrequente spanning tijdens de kernfysische proeven nog naar behoefte wil kunnen variëren. Aangezien het voor een goede werking van het cyclotron essentieel is dat de onderlinge positie van stator en stemvork, benevens de amplitude van de laatste, tijdens het werken niet noemenswaard veranderen (b.v. minder dan 0,1 mm), om de grenzen van het frequentieverloop te handhaven, moest hiervoor een vrij omvangrijke regelapparatuur aangebracht worden. Deze apparatuur, die hieronder ook kort zal worden beschreven, heeft bovendien de functie, de stemvork voor beschadiging te vrijwaren: bij een storing schakelt zij de aandrijving en eventueel ook de hoogfrequentieoscillator uit.

Over de buitenkant van elk der beide bladen, en ter plaatse van de stator ook aan de binnenkant, loopt, wanneer het cyclotron werkt, een hoogfrequente stroom van de orde van 1000 ampère. Het afvoeren van de door deze stroom ontwikkelde warmte schept een aantal problemen, waarop we hieronder eveneens nog nader zullen ingaan.

Mechanisch ontwerp van de stemvork

Om de gang van zaken bij het ontwerpen van de stemvork weer te geven, nemen we als uitgangspunten een frequentie van 55 Hz, de maximum- en de minimumcapaciteit en de hoogstens beschikbare ruimte van $200 \times 60 \times 20$ cm³. De huidige vorm is door stapsgewijze ontwikkeling, deels empirisch, deels steunend op theoretische beschouwingen, ontstaan uit het eenvoudige geval van een eenzijdig ingeklemde trillende staaf met constante doorsnede. Rekening moest worden gehouden met de materiaalspanningen en de levensduur, met de aandrijving, het gewicht en de ondersteuning, met de verwarming, en ten slotte met de fabricagemogelijkheden.

Bij de beschrijving van de gang van het ontwerp kunnen we ons vooreerst bepalen tot een beschouwing van de vorm van de lengtedoorsnede (het profiel) van de stemvork. De invloed van de grote breedte der bladen komt in een later hoofdstuk ter sprake.

De eenzijdig ingeklemde trillende staaf

Wanneer een eenzijdig ingeklemde prismatische staaf, met een vrije lengte l en een hoogte h van de doorsnede (*fig.* 7), trilt in zijn grondtrillingsvorm met een grootste doorbuiging p, dan ontstaat

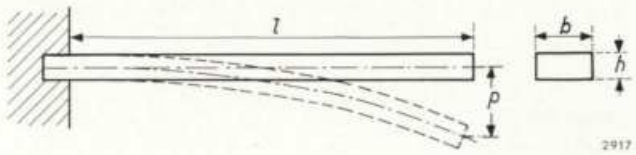


Fig. 7. Eenzijdig ingeklemde prismatische staaf. Voor de beschouwingen over amplitude p, frequentie f_m en buigspanning σ doet de breedte b van de doorsnede er niets toe.

de grootste buigspanning σ ter plaatse van de inklemming. Men heeft:

$$\sigma = 1{,}76 \frac{E h p}{l^2}. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

De grondtrilling (waarbij de staaf vervormt als in fig. 7) heeft de frequentie

$$f_m = 0{,}162 \frac{c h}{l^2}. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

Hierbij is E de elasticiteitsmodulus en c de geluidssnelheid voor het materiaal van de staaf. Uit (1) en (2) volgt direct de belangrijke betrekking:

$$\sigma = K_v \frac{E}{c} f_m p, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

waarin de lengte en de dwarsdoorsnede van de staaf in het geheel niet meer voorkomen. De numerieke factor K_v is hierbij 10,9. We schrijven de formule in deze vorm, omdat hij aldus ook voor andere vormen van het staafprofiel blijkt te gelden, alleen met andere waarden voor de „vormfactor" K_v.

Alvorens uit formule (3) conclusies te trekken, willen we nog de materiaalkeuze bespreken. Uit een oogpunt van vermoeiingssterkte en fabricagemogelijkheden kwamen praktisch alleen aluminium en (onmagnetisch) staal in aanmerking. De geluidssnelheid c in beide materialen is ca. 5000 m/sec, men zou dus blijkens verg. (2) in beide gevallen met dezelfde afmetingen kunnen werken. Het kleinere gewicht van aluminium, alsmede de betere elektrische geleiding, de geringere mechanische demping en de betere bewerkbaarheid gaven de doorslag voor de keuze van dit materiaal, of althans van een aluminiumlegering: het „Permandur", dat een zeer grote vermoeiingssterkte bezit en een nog redelijk elektrisch geleidingsvermogen.

Verg. (3) brengt voor het geval van de staaf het algemene feit tot uitdrukking dat men bij een trillend lichaam de eigen frequentie f_m en de amplitude p

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

niet onafhankelijk opvoeren kan, daar men dan vastloopt op de toelaatbare belasting van het materiaal. Dit feit kan b.v. zijn invloed doen gelden bij mechanische geluidsregistratie, indien men de hoogste hoorbare frequenties nog met behoorlijke amplitude wil schrijven [3]). Het is misschien verrassend dat we bij onze stemvork reeds voor de relatief lage frequentie van 55 Hz ermee te maken krijgen. Dit is te wijten aan de zeer grote vereiste amplitude. Uit een schatting van de verkrijgbare capaciteitsvariatie met een triller volgens fig. 7 was de eis afgeleid dat $p = 1{,}25$ cm. Substitueren we deze waarde voor p in verg. (3), met de genoemde f_m en c en met $E_{Al} = 0{,}7 \times 10^6$ kg/cm², dan vinden we een spanning $\sigma = 1050$ kg/cm². Deze spanning is veel groter dan de waarde van 600 kg/cm² die bij aluminium voor een redelijke levensduur, ca. 10^9 trillingen, als toelaatbaar wordt beschouwd.

Dat $p = 1{,}25$ cm voor een frequentie $f_m = 55$ Hz als een zeer grote waarde moet worden beschouwd, beseft men misschien het best door de situatie te vergelijken met die bij statische belasting. Voor de gewenste eigen frequentie kan men de staaf b.v. 1,5 cm dik en 46,8 cm lang maken (zie verg. 2). Bij een breedte van de „staaf" van 2 meter, gelijk aan die van de later uitgevoerde stemvork, moet dan op het vrije einde een (gelijkmatig verdeelde) kracht van 4,4 ton werken om een doorbuiging van 1,25 cm te veroorzaken.

Met een prismatische staaf kon dus niet aan de geformuleerde eisen worden voldaan.

Door Kirchhoff is al in 1879 de aandacht gevestigd op het feit dat bij staven met wigvormig profiel (*fig. 8*), voor dezelfde eigen frequentie en doorbuiging, de buigspanning aanmerkelijk kleiner is [4]). Hier geldt verg. (3) met de veel

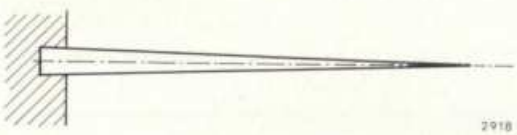


Fig. 8. Eenzijdig ingeklemde staaf met wigvormig profiel.

kleinere vormfactor $K_v = 2{,}78$. Dit zou het mogelijk maken de gewenste capaciteitsvariatie te verkrijgen met een buigspanning van slechts 260 kg/cm². Weliswaar kan men een echte wig niet toepassen, omdat een scherpe kant, nog afgezien van de moeilijke vervaardiging en de mechanische kwetsbaarheid, een veel grotere kans op elektrische doorslag tussen triller en stator zou meebrengen. Men kan echter, als compromis tussen prisma- en wigvorm, aan het profiel de vorm van een afgeknotte wig geven, waarvoor de vormfactor K_v een waarde tussen 10,9 en 2,78 zal hebben. De berekening van de eigen frequentie en de vormfactor van een staaf met zulk een profiel is vrij gecompliceerd. Uit een aantal berekeningen [5]) werd ten slotte de in *fig. 9* getekende

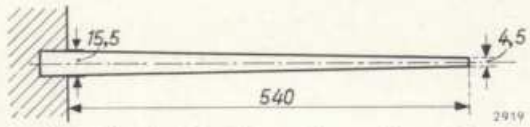


Fig. 9. Eenzijdig ingeklemde staaf met als profiel een afgeknotte wig, die voor de triller werd gekozen.

vorm afgeleid, met een vormfactor $K_v = 4{,}87$. De maximale buigspanning bedraagt bij deze staafvorm 460 kg/cm² en ligt dus ruim beneden de toelaatbare waarde van 600 kg/cm².

Voor wie hier belang in stelt, zij de gang der berekening kort geschetst. Voor een staaf met dichtheid ϱ en met rechtlijnig begrensd profiel als in fig. 9, waarvan de dwarsdoorsnede op afstand 1 van de top van de (complete) wig de oppervlakte A_0 en het traagheidsmoment I_0 heeft, wordt de uitwijking y als functie van de afstand u tot deze top gegeven door de differentiaalvergelijking [6]):

$$4\pi^2 f_m^2 y = \frac{E I_0}{\varrho A_0} \frac{1}{u} \frac{d^2}{du^2}\left(u^3 \frac{d^2 y}{du^2}\right). \quad \ldots\ldots \quad (4)$$

Door over te gaan op de nieuwe variabele

$$v = 2\pi f_m u \sqrt{\frac{\varrho A_0}{E I_0}}, \quad \ldots\ldots \quad (5)$$

wordt (4) in de eenvoudiger vorm gebracht:

$$v y = \frac{d^2}{dv^2}\left(v^3 \frac{d^2 y}{dv^2}\right). \quad \ldots\ldots \quad (6)$$

Men controleert gemakkelijk dat elke oplossing van de differentiaalvergelijking

$$v \frac{d^2 y}{dv^2} + 2 \frac{dy}{dv} = y \quad \ldots\ldots \quad (7a)$$

aan (6) voldoet, en hetzelfde geldt voor elke oplossing van

$$v \frac{d^2 y}{dv^2} + 2 \frac{dy}{dv} = -y. \quad \ldots\ldots \quad (7b)$$

De algemene oplossing van (6) kan derhalve worden geschreven als lineaire combinatie van de algemene oplossingen van de vergelijkingen (7a) en (7b) — die speciale vormen van de differentiaalvergelijking van Bessel zijn. Deze oplossingen zijn:

$$y = \tfrac{1}{2} v^{-\frac{1}{2}} \left[A J_1(2v^{\frac{1}{2}}) + B N_1(2v^{\frac{1}{2}})\right]$$

en

$$y = -\tfrac{1}{2} v^{-\frac{1}{2}} \left[jC J_1(2jv^{\frac{1}{2}}) + D H_1^{(1)}(2jv^{\frac{1}{2}})\right],$$

waarin J_1, N_1 en $H_1^{(1)}$ respectievelijk de bekende functies van de eerste orde van Bessel, Neumann en Hankel zijn.

[3]) Zie b.v. A. Th. van Urk, De geluidsschrijver van het Philips-Miller-systeem, Philips techn. T. **1**, 135-141, 1936, formule (3).

[4]) G. Kirchhoff, Über die Transversalschwingungen eines Stabes von veränderlichem Querschnitt, Ann. Wiedemann **10**, 501-512, 1880.

[5]) Zie: F. Krienen, Modulator CERN synchro-cyclotron, CERN-rapport 58-8, 23 april 1958.

[6]) Zie b.v. J. W. Strutt (Baron Rayleigh), The theory of sound, Macmillan, Londen 1926 (2e ed.), deel I, hfdst. 8; P. M. Morse, Vibration and sound, McGraw-Hill, New York 1948.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Met de nieuwe variabele $w = 2v^{\frac{1}{2}}$ krijgt men voor de uitwijking ten slotte de vergelijking:

$$wy = AJ_1(w) + BN_1(w) - jCJ_1(jw) - DH_1^{(1)}(jw) \quad . \quad . \quad (8)$$

De vier integratieconstanten A, B, C, D moeten uit de randvoorwaarden worden bepaald. Deze zijn:

1) De hellingshoek dy/du is bij de inklemming $= 0$.
2) De uitwijking y is bij de inklemming $= 0$.
3) Het buigend moment — dus d^2y/du^2 — is aan het vrije einde $= 0$.
4) De dwarskracht — dus d^3y/du^3 — is aan het vrije einde $= 0$.

Substitutie van deze randvoorwaarden in (8) levert vier homogene vergelijkingen in de vier constanten. Dit stelsel heeft alleen een oplossing als de determinant ervan, die uit 16 besselfuncties bestaat, nul is. Uit de aldus verkregen vergelijking kan men, zij het op niet zeer eenvoudige wijze, de eigen waarden w en daarmee via verg. (5) de eigen frequenties f_m bepalen. Hiervan interesseert ons alleen de laagste (de grondfrequentie).

De omgebogen staaf

Ook met het afgeleide profiel is de ingeklemde staaf — of liever: ingeklemde plaat, gezien de grote breedte — toch niet rechtstreeks voor de praktijk geschikt. Het is niet te vermijden dat bij de inklemming een merkbare deformatie van de randen der inklemblokken optreedt, met alle kwade gevolgen van dien. Voorts worden er bij het trillen behalve transversale ook grote longitudinale krachten op de inklemming uitgeoefend, en terwijl men de transversale in ons geval zou kunnen balanceren, nl. door twee in tegenfaze trillende platen te nemen die in hetzelfde blok zijn ingeklemd, is zulk een balancering voor de longitudinale niet goed mogelijk; deze krachten worden dus via de inklemming overgebracht op de stub en op de versnellingskamer van het cyclotron.

Men ziet hoe deze moeilijkheden omzeild zijn door over te gaan op de vorm van de „stemvork". We kunnen deze opgebouwd denken uit twee staven, ieder met een profiel als hierboven afgeleid (fig. 9) maar omgebogen tot een halve U. Op de plaats waar de twee halve U's onderling zijn „verbonden" (in werkelijkheid is natuurlijk de hele U uit een massief blok materiaal vervaardigd), zijn nu dezelfde randvoorwaarden gerealiseerd als bij een inklemming. Er behoeven echter in het geheel geen inklemkrachten op de omgeving te worden overgebracht, daar men de stemvork aan slappe veren kan ophangen. De stemvork voert dan in de grondtrilling een beweging uit als in *fig. 10* geschetst.

Een exacte berekening van de trillingsvorm en frequentie van de tot een halve U omgebogen staaf is niet mogelijk. Proefondervindelijk blijkt dat de frequentie van de staaf bij het ombuigen weinig verandert [7]). Onderzoek van de trillingsvorm van een model (plaatbreedte 30 cm) met behulp van stroboscopische verlichting toonde aan dat ook de uitwijkingen ten opzichte van het middenvlak van het profiel door het ombuigen weinig veranderen. Er bleef echter nog de belangrijke vraag open, of in de omgebogen vorm van de staaf de mechanische spanningen σ bij gegeven frequentie f_m en amplitude p niet aanzienlijk hoger zouden zijn dan bij de rechte staaf. Uit de gelijkheid der trillingsvormen mochten we wel besluiten dat de maximale kinetische energie in beide gevallen dezelfde is, en dus ook de maximale potentiële energie (buigingsarbeid). Maar om hieruit te concluderen dat ook de spanningen in de omgebogen en in de rechte staaf dezelfde zijn, hadden we zekerheid moeten hebben dat de neutrale zone bij het heen-en-weerbuigen van de omgebogen staaf in het genoemde middenvlak van zijn profiel blijft, zoals bij de rechte staaf het geval is. Deze zekerheid hadden we geenszins, er was integendeel reden om aan te nemen dat de neutrale zone verschuift, aan-

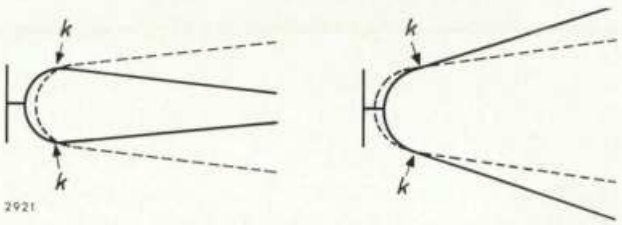


Fig. 10. Uiterste standen van de stemvork in de grondtrillingsvorm. De rusttoestand is gestippeld aangegeven. Elk der bladen vertoont een „knooplijn" bij k.

gezien men weet dat dit bij dikke gebogen ringen het geval is en aangezien het grootste deel van de buigingsenergie van de U-staaf opgehoopt is in het deel dat het meest op zo'n ring lijkt.

De eenvoudigste weg uit deze moeilijkheid was een rechtstreekse meting van de optredende mechanische spanningen. Daartoe werden op het reeds genoemde model aan binnen- en buitenkant rekstrookjes geplakt. Voor de grootste buigwisselspanning aan de buitenkant vonden we de waarde 370 kg/cm², aan de binnenkant 510 kg/cm². Deze waarden leken ons voldoende veilig ten opzichte van de „toelaatbare" spanning van 600 kg/cm². Zekerheidshalve werd nog een model op schaal 1 : 4 vervaardigd, waarin bij 4× zo kleine amplitude en 4× zo grote frequentie (220 Hz) dezelfde buigspanningen optreden, en aan een levensduurproef van 10^9 trillingen onderworpen. Dank zij de hogere frequentie behoefde het model hiervoor slechts 52 etmalen te trillen. Het model doorstond deze proef goed.

In feite gaven pas deze uitkomsten de mogelijkheid, de modulatiefrequentie vast te stellen op 55 Hz. Voordien gold veeleer de richtlijn, de mo-

[7]) Voor de prismatische staaf (fig. 7) is dit ook theoretisch aangetoond; zie C. H. Keulegan, On the vibration of U-bars, Bur. Stand. J. Res. **6**, 553-592, 1931.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

dulatiefrequentie zo hoog mogelijk te kiezen. Dit is immers gunstig voor een grote gemiddelde protonenstroom, en de bovenste grens die aan de herhalingsfrequentie wordt gesteld, nl. door de eis dat de deeltjes voldoende tijd moeten hebben om hun eindenergie te bereiken, ligt veel hoger (boven 100 Hz), zoals in II is uiteengezet.

De ware vereiste afmetingen van de stemvork (fig. 2), die bij al deze beschouwingen over frequentie, amplitude, trillingsvorm en spanningen nog niet in het geding behoefden te komen, werden vastgelegd door de absolute grootte van de capaciteit die moest worden verkregen.

Na deze voorbereidende onderzoekingen werden twee stemvorken (één voor reserve) met de gewenste afmetingen vervaardigd uit twee gewalste blokken aluminium. Deze blokken waren met ultrasone golven op materiaalfouten onderzocht. Na de machinale bewerking zijn de stemvorken op 0,1 mm nauwkeurig met de hand bewerkt. Wegens de grote invloed van de oppervlakgesteldheid op de vermoeidheidssterkte (kerfwerking) is het gebogen gedeelte van binnen en van buiten gepolijst.

Voor de constructie van de stator was het van belang te toetsen of in de gesloten stand de uitwijking der lippen over de gehele breedte van 2 m voldoende constant was. Dit werd weer nagegaan met stroboscopische belichting. De uitwijking, gemeten met een fout van hoogstens 0,1 mm, bleek binnen de toelaatbare speling van 0,2 mm constant te zijn. De stator kon dus als rechte balk van constant profiel uitgevoerd worden. Dit profiel moest nog worden aangepast bij de vorm van de stemvorkbladen in de gesloten stand. Het gedeelte A-B van de bladen (zie fig. 5), waar het hier om gaat, bleek binnen 0,1 mm recht te blijven.

Het aandrijfmechanisme

Uit de in fig. 10 geschetste trillingsvorm blijkt dat we de stemvork in de gewenste trilling kunnen brengen door de voet in de richting van de symmetrie-as periodiek te bewegen, met een frequentie gelijk aan de grondfrequentie van de stemvork. In eerste instantie zou men wellicht eraan denken, de voor deze beweging nodige wisselkracht op de voet uit te laten oefenen door een vast opgesteld systeem, dat b.v. magnetostrictief of elektromagnetisch of elektrodynamisch (als een luidspreker) zou kunnen werken. Uit modelproeven werd al spoedig duidelijk dat de trillingsoverbrenging op de omgeving bij een vast opgesteld aandrijfsysteem prohibitief wordt. We kunnen dit illustreren door een schatting van de nodige wisselkrachten — die immers als reactiekrachten op de ondersteuning van de aandrijving zullen werken. In de beide bladen van de stemvork wordt een trillingsenergie opgehoopt van ca. 60 joule. Op grond van zeer ruwe modelproeven werd geschat dat hiervan ca. $\frac{1}{2}\%$ per trilling gedissipeerd wordt. Het door de aandrijving bij een frequentie $f_m = 55$ Hz toe te voeren vermogen kon dus worden geschat op $P = 15$ watt (zie ook hieronder). Onderstellen we dat de aandrijvende kracht F in faze is met de snelheid $\dot{x}$ van de verplaatsing van de voet, dan geldt:

$$P = \tfrac{1}{2} \times 2\pi f_m \hat{x}\, \hat{F}.$$

Bij de onderstelde amplitude van de lippen (1,25 cm) wordt $\hat{x} \approx 0{,}15$ mm. Hieruit volgt $\hat{F} \approx 600$ newton! Aan de genoemde fazeconditie zal in de praktijk in het algemeen niet geheel voldaan kunnen worden, zodat men wel met een nodige wisselkracht van ongeveer 1200 newton moet rekenen.

Nog tal van andere eisen en beperkingen maakten het probleem van de aandrijving moeilijk. Er was maar een beperkte ruimte voor het mechanisme beschikbaar, het mechanisme moest in geval van storing gemakkelijk uitwisselbaar zijn, de afvoer van warmte (koper- en ijzerverliezen) kon wegens de plaatsing in vacuüm vrijwel alleen door geleiding geschieden, om dezelfde reden mochten geen constructies toegepast worden die smering vereisen, en ten slotte moest de aandrijving kunnen werken op een plaats waar het spreidingsveld van de cyclotronmagneet nog een aanzienlijke sterkte bezit.

De oplossing werd gevonden in een „interne" aandrijving met hulpmassa, waarbij géén vast steunpunt gebruikt wordt. Schematisch is de constructie in *fig. 11* weergegeven, de foto's *fig. 12a* en *b* tonen

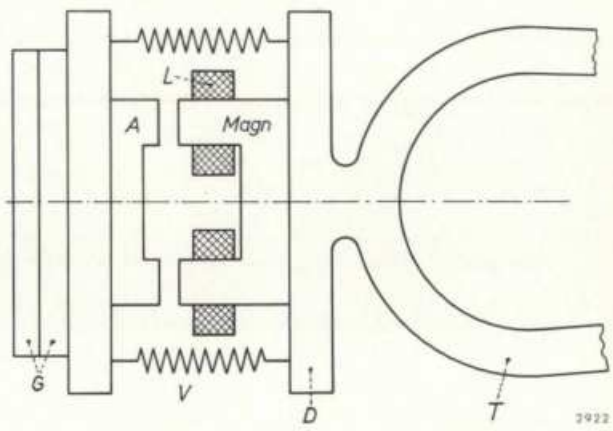
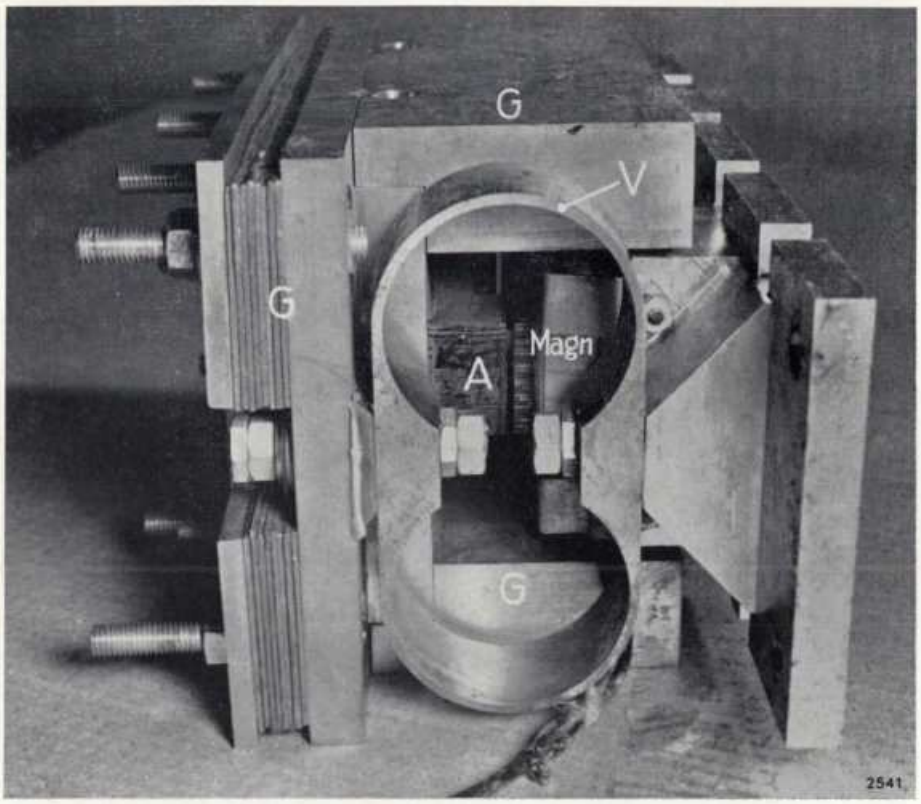


Fig. 11. Schematische voorstelling van het aandrijfmechanisme. T stemvork met voet D, waaraan bevestigd de elektromagneet *Magn* met spoelen L. A anker, dat door veren V eveneens met de voet van de stemvork is verbonden. Het anker is verzwaard door messing gewichten G. Deze zijn in werkelijkheid ten dele om de magneet heen gemonteerd, uit gebrek aan ruimte en ook om het buigend moment op de veren zo klein mogelijk te houden.

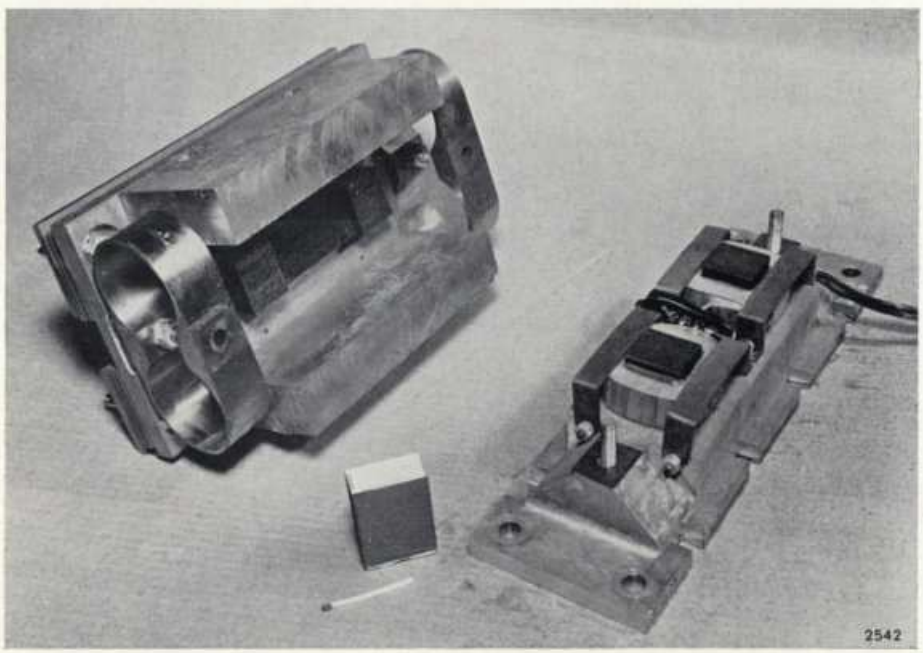
Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

de uitvoering. Tegen de voet van de stemvork is een elektromagneet met gelamelleerde kern geschroefd. Het anker van deze magneet, verzwaard door enige blokken messing tot een totaal gewicht van 17 kg, is door twee zeer stijve veren van chroomnikkelstaal eveneens aan de voet verbonden; de resonantiefrequentie van dit systeem (hulpmassa en veren) is vrijwel gelijk aan de grondfrequentie van de stemvork, 55 Hz. Bekrachtigen we nu de elektromagneet met een wisselstroom van 27,5 Hz (de halve resonantiefrequentie, omdat de magnetische kracht niet van richting omkeert als de stroom dit doet), dan worden stemvork en hulpmassa in tegengestelde faze met 55 Hz in trilling gebracht. De amplitude van de relatieve verplaatsing wordt ca. 1 mm. Door de opslingering van de ankertrilling wordt de amplitude van de kracht F die de veren overbrengen op de voet van de stemvork, ongeveer $6\times$ zo groot als de amplitude van de kracht F_m waarmee de magneet het anker aantrekt. Men kan daardoor, om de eerder genoemde waarde $\hat{F} \approx 1200$ newton te verkrijgen, met een redelijke bekrachtigingsstroom volstaan.



a



b

Fig. 12. *a*) Aandrijfmechanisme, gereed om tegen de voet van de stemvork te worden geschroefd. Betekenis van de letters als in fig. 11.
b) Het mechanisme, uit elkaar genomen. Rechts de elektromagneet met spoelen op grondplaat, links de hulpmassa met gelamelleerd anker en veren.
De rechthoekige uitsparingen in de grondplaat maken het mogelijk koelleidingen te bevestigen, die het in de elektromagneet gedissipeerde vermogen (enige tientallen watt, zie blz. 188) afvoeren.

Voor de bekrachtigingsspoelen kon met voordeel gebruik worden gemaakt van een bij Philips uitgewerkte nieuwe wikkeltechniek voor lakdraad, waarbij geen papierisolatie vereist is en waarmee een bijzonder grote vulfactor (85%) en een goede warmteafvoer (1 W/m² per °C/m) worden verkregen *) — eigenschappen die voor het onderbrengen van de magneet in de beperkte ruimte in het hoogvacuüm belangrijk waren.

*) *Noot van de redactie:* Van deze wikkeltechniek, waarvan reeds voor vele toepassingen het belang gebleken is, hopen we binnenkort een beschrijving in dit tijdschrift te geven.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Gewezen zij nog op de bijzondere vorm der veren, die in fig. 12*a* en *b* goed te zien is. De vervaardiging van deze veren uit één stuk materiaal bood enige moeilijkheden, doch het resultaat rechtvaardigt de moeite: de veren hebben een zeer constante stijfheid, van 1000 N/mm elk, garanderen een onwrikbare inklemming, en bezitten een relatief veel grotere stijfheid in dwarsrichting — allemaal eigenschappen die met de meer gebruikelijke schroefveren en samengestelde bladveren niet in voldoende mate konden worden verkregen. Een bijkomstig voordeel is de gemakkelijke montage. De optredende buigspanningen zijn vrij groot, tot 3000 kg/cm², hetgeen een zeer gladde afwerking ter vermijding van vermoeidheidsbreuk door kerfwerking nodig maakte.

We geven in het kort aan, hoe de vereiste grootte van hulpmassa, veerstijfheid en magnetische kracht werd afgeleid. Voor dit doel kon het systeem van stemvork + aandrijfmechanisme worden vervangen door het model dat in *fig. 13* is getekend. M'' is de hulpmassa, S'' de stijfheid van de chroomnikkelstalen veren. De wrijvingsweerstand B'' stelt de hysteresis- en wervelstroomverliezen van de elektromagneet en de deformatieverliezen van de veren voor. De continu verdeelde massa van de

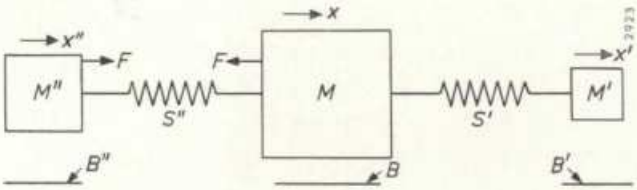


Fig. 13. Vervangschema van de stemvork en het aandrijfmechanisme, ter opstelling van de differentiaalvergelijkingen van de beweging en ter bestudering van het gedrag van het gehele systeem.

stemvork is vervangen door twee geconcentreerde massa's M en M', overeenkomstig de gedeelten die resp. tussen en aan weerszijden buiten de „knooplijnen" van de grondtrillingsvorm liggen (vgl. fig. 10); verder zijn een geconcentreerde stijfheid S' van de stemvork en geconcentreerde wrijvingsweerstanden B en B' ingevoerd. B vertegenwoordigt de mechanische demping in de ophanging (fig. 2), die in eerste instantie verwaarloosd kan worden; B' hangt samen met de inwendige demping van het materiaal van de stemvork, met wervelstroomverliezen in het spreidingsveld van de cyclotronmagneet en, bij sommige proeven die tijdens de ontwikkeling gedaan werden, met de wrijving in de atmosfeer (lucht of waterstofgas). De grootheden M, M', S' en B' konden berekend worden uit de grondfrequentie f_m, de totale potentiële energie W (vervormingsarbeid) van de trillende stemvork en het gemeten vermogen P dat werd opgenomen bij resonantie. (M blijkt daarbij gelijk gesteld te moeten worden aan de ware massa van de gehele stemvork en alle daarmee star verbonden onderdelen.) Men heeft nu voor de beweging der drie massa's de drie differentiaalvergelijkingen:

$$\left.\begin{aligned} M\ddot{x} + B\dot{x} + S'(x-x') + S''(x-x'') &= F_m\,, \\ M'\ddot{x}' + B'\dot{x}' + S'(x'-x) &= 0\,, \\ M''\ddot{x}'' + B''\dot{x}'' + S''(x''-x) &= -F_m\,. \end{aligned}\right\} \quad . \; . \quad (9)$$

Met behulp van deze vergelijkingen is het gedrag van het trillende systeem uitvoerig bekeken. In het bijzonder kon de kracht F op de voet van de stemvork, die gegeven is door:

$$F = F_m + S''(x''-x), \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (10)$$

voor uiteenlopende omstandigheden worden berekend. We willen hier slechts één, min of meer onverwacht, resultaat van deze berekeningen vermelden: een stabiele werking blijkt het best gewaarborgd indien de eigen frequentie van het systeem, gevormd door de beide massa's M en M'' en de veer S'', ca. 0,5 Hz lager ligt dan de resonantiefrequentie van het gehele systeem. Dit is ook proefondervindelijk bevestigd.

Om het aanslaan van ongewenste trillingsvormen van het systeem niet in de hand te werken en om niet onnodig energie in de spoelen te dissiperen (die de warmteafvoer in het vacuüm zou bemoeilijken), is het gewenst dat de magnetische kracht op het anker geen hogere harmonischen van de grondfrequentie bevat, dus zuiver sinusvormig verloopt. Het daartoe vereiste verloop van de bekrachtigingsstroom is geenszins sinusvormig, aangezien de magnetische kracht bij gegeven stroom nog sterk afhangt van de, bij het trillen variërende, lengte van het interferricum. Een en ander wordt door *fig. 14* geïllustreerd.

De bekrachtigingsstroom met het gewenste verloop wordt verkregen door de sinusvormige spanning van een *RC*-oscillator toe te voeren aan een balansversterker, die werkt in instelling klasse C. De eigen frequentie van de *RC*-oscillator is ruwweg 27,5 Hz. Trilt de stemvork, dan werpt hij, doordat één der bladen het licht van een vast opgesteld lampje weerkaatst, periodieke lichtflitsen op een fotocel. De hierdoor opgewekte spanningsstootjes synchroniseren de *RC*-oscillator. Door deze „terugkoppeling", waarvan ook automatisch de juiste faze wordt ingesteld, trilt de stemvork altijd precies in zijn eigen grondfrequentie.

Het signaal van de fotocel wordt tevens gebruikt voor het synchroniseren van de inschakelperiodes van de hoogfrequentieoscillator van het cyclotron: men laat deze nl., om geen energie te verspillen, slechts in die helft van elke modulatieperiode werken waarin nuttige versnelling van deeltjes kan plaatsvinden (dalende f). Voorts kan men het signaal gebruiken ter synchronisatie van de ionenbron — als men deze pulserend laat werken — en eventueel van apparaturen die bij het experimenteren met de deeltjesbundels van het cyclotron te pas komen.

Ongewenste trillingstoestanden

De trillingsvorm van de stemvork waarom het ons begonnen is — de „grondtrilling" —, is zuiver tweedimensioneel. Derhalve hebben we in het bovenstaande in hoofdzaak slechts met het profiel van

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

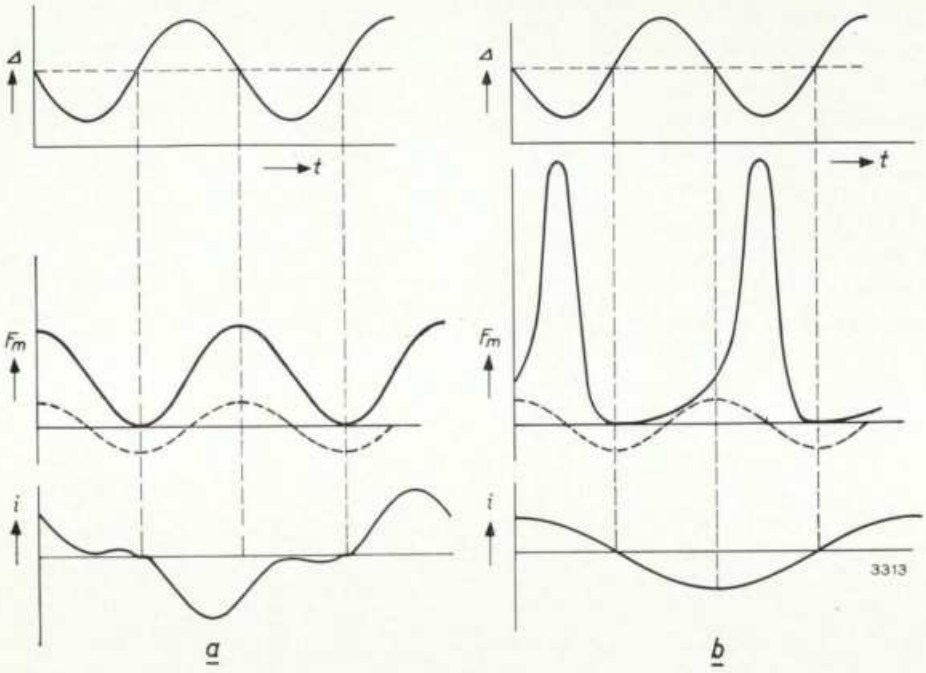


Fig. 14. Voeding van het aandrijfmechanisme. Van boven naar beneden ziet men, als functie van de tijd t: de relatieve verplaatsing van het anker (lengte Δ van het interferricum), waarvoor we een sinusvormig verloop onderstellen; de magnetische aantrekkingskracht F_m; de stroom i waarmee de elektromagneet wordt bekrachtigd. Gestippeld is het verloop van de snelheid van het anker getekend.

De grafieken (*a*) slaan op een stroomverloop dat zodanig is gekozen dat er een sinusvormig verloop van de kracht resulteert. De grafieken (*b*) geven het geval weer van een sinusvormig stroomverloop; de kracht is hierbij in sterke mate met hogere harmonischen behept.

de stemvork te maken gehad. De derde dimensie die de stemvork bezit (breedte 2 m!) geeft echter de mogelijkheid tot het optreden van driedimensionele trillingstoestanden, zoals die bekend zijn van membranen en platen. Door excitatie met de respectieve eigen frequenties kan men de verschillende trillingsvormen doen ontstaan en met behulp van opgestrooid zand zichtbaar maken (figuren van Chladni, zie b.v. *fig. 15* [8]). Is de eigen frequentie van zo'n trillingsvorm gelijk of bijna gelijk aan een geheel veelvoud van de grondfrequentie, dan kan deze trilling direct door de aandrijvende kracht of via een interne koppeling met de grondtrillingsvorm (b.v. door de poissoncontractie) worden aangestoten. Hij wordt dan op de grondtrilling gesuperponeerd, hetgeen de werking van de modulator in de war stuurt.

De kans op een dergelijke gevaarlijke coïncidentie van frequenties is klein, maar het toeval wilde dat wij er inderdaad mee te maken kregen. Om de hiertegen genomen maatregelen te kunnen toelichten, gaan we iets dieper op de mogelijke trillingstoestanden in.

We duiden de trillingsvormen aan met twee indices, die voor één blad van de stemvork het aantal knooppunten respectievelijk aan de zijkant (waarbij de essentieel noodzakelijke „knoop" bij de voet, zie fig. 10, niet wordt meegeteld) en aan de voorkant aangeven. Bovendien voegen we een *s* of een *a* toe, naar gelang de twee bladen symmetrisch of antisymmetrisch trillen, zie *fig. 16*; beide gevallen zijn

[8]) Over deze fraaie figuren op de stemvork is in dit tijdschrift al eerder een korte mededeling gepubliceerd: B. Bollée, Chladni-figuren op de trilcondensator van een synchrocyclotron, Philips techn. T. **19**, 92-93, 1957.

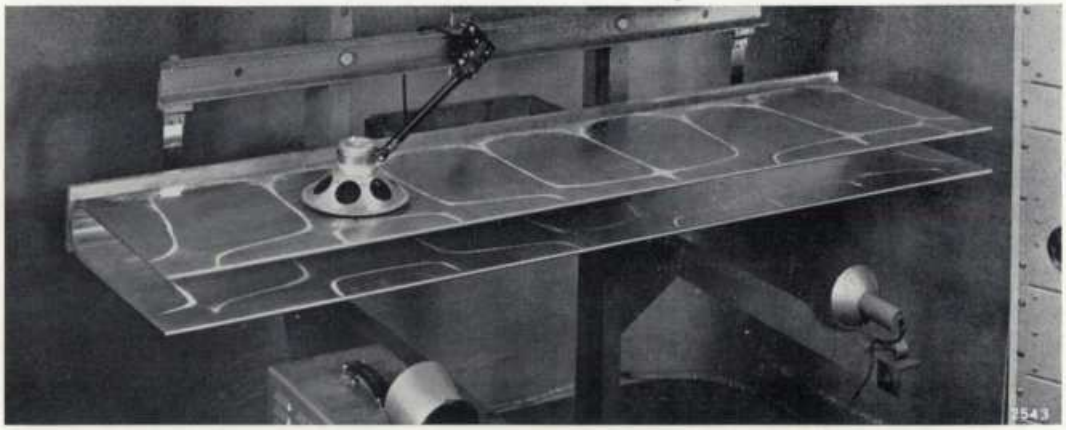


Fig. 15. Voorbeeld van Chladni-figuur, die men kan krijgen als de stemvork in een bepaalde — ongewenste — trillingstoestand wordt gebracht door excitatie met de desbetreffende eigen frequentie [8]).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

mogelijk, daar ook bij antisymmetrische trilling der bladen het zwaartepunt van het geheel op zijn plaats blijft. In deze nomenclatuur is *s00* de grondtrillingsvorm, die we nodig hebben. In *fig. 17* zijn een aantal trillingsvormen geschetst en de bijbehorende eigen frequenties uitgezet, die werden gemeten aan een model van de stemvork op schaal 1:4. (Er zijn alleen zogenaamde trillingsvormen van de eerste soort beschouwd, d.w.z. vormen zonder knopen aan de zijkanten, daar de frequenties van vormen van hoger soort veel hoger blijken te liggen en niet gevaarlijk zijn.) Men ziet in fig. 17 dat de frequenties van de vormen *a04* en *s04* vrij dicht bij het tweevoud van die van *s00* liggen. Bij de stemvork zelf, gemonteerd in de vacuümtank, lag *s04* zelfs nog gevaarlijker dan bij het model, en met die trillingsvorm deed zich dan ook de vermelde storing voor. Dit was met name het geval tijdens het warmworden van de stemvork (zie het volgende hoofdstuk). Bij verwarming verschuiven nl. alle eigen frequenties een weinig — niet zo zeer door de uitzetting van

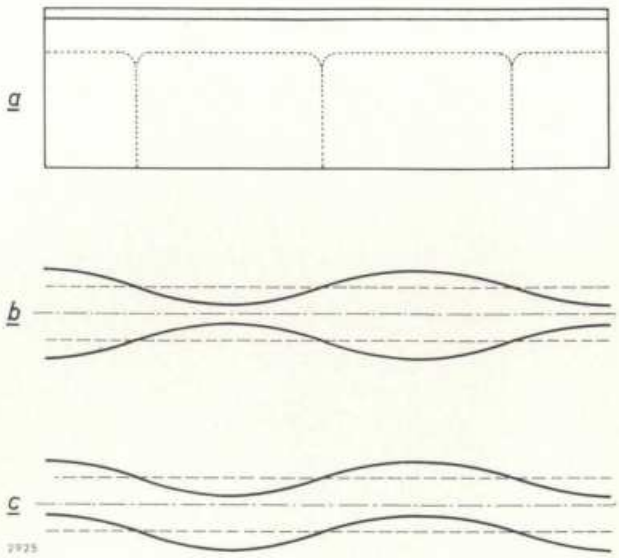


Fig. 16. *a*) Chladni-figuur van een trilling van de stemvork met drie knopen aan de voorkant en géén knoop aan de zijkant der bladen (behalve de essentiële „knoop" volgens fig. 10). De beide bladen kunnen hierbij nog op twee wijzen trillen: symmetrisch (*b*), deze trillingsvorm noemen we *s03*; of antisymmetrisch (*c*), trillingsvorm *a03*.

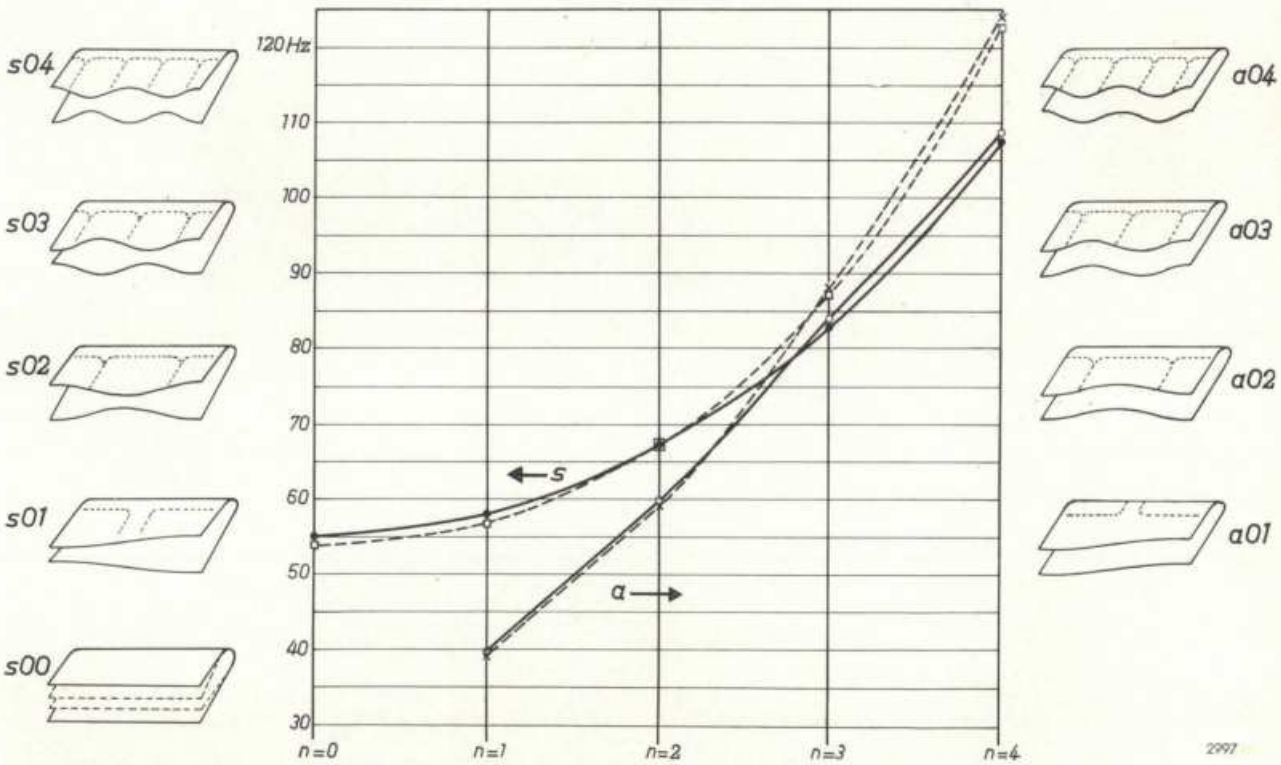


Fig. 17. Eigen frequenties van de trillingsvormen „van de eerste soort" van de stemvork (d.w.z. zonder knopen aan de zijkant der bladen, eerste index = 0), voor de rangnummers $n = 0$ tot 4. De gevulde cirkeltjes behoren bij symmetrische, de open cirkeltjes bij antisymmetrische trillingsvormen. Deze vormen, *s00* tot *s04* en *a01* tot *a04*, zijn resp. links en rechts naast de grafiek geschetst. De getrokken krommen, die door de punten zijn getekend, hebben op het traject tussen de heeltallige waarden van n geen fysische betekenis, ze waren voor ons echter nuttig om, na het opzoeken van de eerste drie resonantiefrequenties, ook de verdere experimenteel te kunnen vinden: de resonanties zijn zo scherp (breedte der resonantiekrommen van de orde van 0,01 Hz) dat men kans loopt ze over het hoofd te zien.

Op de gestippelde krommen vindt men de resonantiefrequenties voor de stemvork met verstijvingsribben volgens fig. 18. Vierkantjes behoren bij de symmetrische, kruisjes bij de antisymmetrische trillingsvormen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

het materiaal maar veeleer door de daling van de elasticiteitsmodulus. Bij een bepaalde, tijdelijk optredende, temperatuurverdeling kwam de trilling *s04* tot resonantie.

Om deze storing op te heffen, kwamen — behalve het vervaardigen van een nieuwe stemvork met iets gewijzigde dimensies, wat om begrijpelijke redenen niet aanlokkelijk was — verschillende maatregelen in aanmerking: een kunstmatige demping, een „ontkoppeling" door inzagen van de bladen, en een verlegging van de gevaarlijke resonantiefrequentie door verkleining van de breedte of door het aanbrengen van een verstijvingsrib op elk der bladen.

Een afweging van de bezwaren en risico's van deze maatregelen en het te verwachten tijdverlies deed de keuze vallen op de verstijvingsribben. *Fig. 18* laat voor één der bladen zien, hoe de rib, die over de

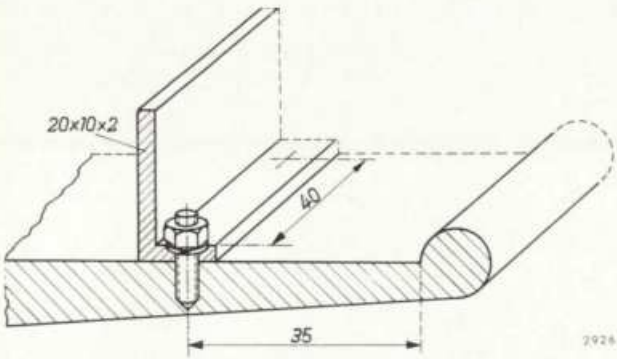


Fig. 18. Plaats en vorm van de verstijvingsrib die op elk der beide bladen werd bevestigd om de excitatie van een ongewenste trillingsvorm te vermijden. (De ribben zijn goed te zien in fig. 24.)

gehele breedte loopt, is aangebracht. De bevestiging van de ribben moest zeer zorgvuldig geschieden, daar deze bij het trillen versnellingen ondergaan van 120 *g*! De ribben veranderen natuurlijk niet alleen de verhouding van de grondfrequentie tot de frequentie van *s04*, maar ook tot die van alle andere trillingsvormen. De kans dat daardoor weer andere coïncidenties optreden, kan men evenwel klein houden. Men kan nl. aantonen dat bij de in de praktijk voorkomende temperatuurverdelingen zeker geen gevaarlijke coïncidenties zullen optreden mits bij homogene temperatuurverdeling alle eigen frequenties op zijn minst 1% van eventuele naburige gehele veelvouden van de grondfrequentie verschillen. Dit volgt uit een schatting betreffende de te verwachten invloed van de plaatselijk verschillende daling van de elasticiteitscoëfficiënt en betreffende de (zeer geringe) breedte van de resonantiekrommen voor de diverse trillingsvormen. De verschuivingen van alle eigen frequenties, teweeggebracht door aanbrengen van ribben, konden met behulp van gegevens, afgeleid uit een model, bij benadering worden berekend voor verschillende plaats en afmetingen van de ribben. Op deze wijze kon een dimensionering worden gevonden waarmee aan de genoemde 1%-voorwaarde was voldaan (fig. 18). Na aanbrengen van deze ribben traden geen ongewenste resonanties meer op. De grondfrequentie zelf is door de ribben gedaald tot 54 Hz. Hierbij is ook het aandrijfmechanisme aangepast.

Het zou hier te ver voeren, de genoemde berekeningen weer te geven. We willen echter wel erop wijzen dat de oplossing van dit probleem, hoewel het schijnbaar slechts een ondergeschikt detail betreft, voor het welslagen van het gehele modulatorproject van doorslaggevend belang is geweest.

De koeling van de stemvork

Een deel van de stemvork (gedeelte AB in fig. 5) fungeert als variabele capaciteit in het hoogfrequentiesysteem en voert dus een hoogfrequente stroom (momentele frequentie f). De afvoer van de hierdoor ontwikkelde warmte moest om verschillende redenen zeer zorgvuldig worden bekeken. We willen dit toelichten en de gevonden oplossing bespreken.

De te verwachten warmteontwikkeling kon vrij goed worden berekend. Aangezien de lengte van de stemvork klein is ten opzichte van de golflengte, mogen we de stroom hierin met goede benadering als quasistationair beschouwen. Deze stroom wordt gegeven door:

$$\hat{I} = \frac{\hat{U}_D}{\zeta} \sin \frac{2\pi f l}{c}, \quad \ldots \quad (11)$$

waarin l de afstand van de stemvork tot de Dee-mond is, ζ de golfweerstand van Dee en Dee-hals, U_D de spanning op de Dee-mond en c de lichtsnelheid. $\hat{U}_D$ varieert met de frequentie f, van ca. 8 kV bij 29 MHz tot ca. 25 kV bij 16,5 MHz. Met $l = 3{,}5$ m en de in een voorlopig stadium van het ontwerp aangenomen waarde $\zeta = 6$ ohm volgt hieruit dat $\hat{I}$ varieert van 3100 tot 1550 ampère. Is s de lengte en b de breedte van de stemvork, d de indringingsdiepte van de hoogfrequente stroom en ϱ_{Al} de soortelijke weerstand van de aluminiumlegering, dan geldt voor de weerstand:

$$R = \frac{s\varrho_{Al}}{2bd}. \quad \ldots \quad (12)$$

We kunnen invullen $s = 60$ cm, $b = 2$ m, $\varrho_{Al} = 4{,}926 \times 10^{-8}$ ohm m bij kamertemperatuur, maar de indringingsdiepte d varieert weer met de frequentie, van 22 micron bij 29 MHz tot 29 micron bij 16,5 MHz. Het gemiddelde vermogen vinden we door integratie van $\frac{1}{2}I^2R$ over één modulatieperiode, waarbij we gebruik moeten maken van het reeds

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

bekende tijdsverloop van de frequentie (fig. 6c) en waarbij we rekening ermee moeten houden dat men de hoogfrequente oscillator slechts gedurende ongeveer de helft van elke modulatieperiode laat werken (zie boven). Grafische uitvoering van de integratie leidde tot de waarde $P = 240$ watt.

Behalve deze elektrische dissipatie hebben we een warmteontwikkeling door de mechanische verliezen in de trillende stemvork, doch volgens het voorgaande bedragen deze verliezen, ruw geschat, slechts ongeveer 15 watt.

Het afvoeren van een gedissipeerd vermogen van ca. 250 W van het grote oppervlak van de stemvork zou in geval van convectie een peuleschilletje zijn; in vacuüm wordt het een probleem. Vertrouwend op de grote oppervlakte, zou men hier in de eerste plaats aan afvoer van de warmte door straling kunnen denken. Een eenvoudige schatting leert dat dit geen bruikbare oplossing is. De totale stralende oppervlakte mogen we op $2 \times 200 \times 60$ cm² stellen (de warmte verspreidt zich gemakkelijk genoeg in de gehele stemvork). Er moet dus tussen de koperen buitengeleider van het hoogfrequentiesysteem en de aluminium stemvork een zodanig temperatuurverschil bestaan dat er rond 0,01 W/cm² overgebracht wordt. Rekening houdend met de absorptiecoëfficiënten van koper en aluminium (beide bedragen ca. 0,2), komt men tot een temperatuurverhoging van ca. 120 °C van het aluminium. Deze temperatuurverhoging is ten enenmale ontoelaatbaar. Niet alleen zou de eigen frequentie van de stemvork er ongeveer 1 Hz door zakken, waardoor het samenspel met het aandrijfmechanisme minder gunstig zou worden (zie de frequentievoorwaarde, genoemd op blz. 179, aan het einde van de klein gedrukte tekst), maar vooral zou het materiaal van de stemvork er niet tegen bestand zijn: bij temperaturen boven ca. 100 °C treedt in de aluminiumlegering een rekristallisatie op, waardoor het materiaal zijn gunstige eigenschappen verliest.

Een verbetering van de stralingskoeling door kunstmatig zwart maken (vergroting van de genoemde absorptiecoëfficiënt) van de stemvork en de koperen buitengeleider stuitte op praktische bezwaren. Chemisch zwarten van de stemvork (microscopisch ruwmaken van het oppervlak) komt niet in aanmerking, daar dit een funeste invloed heeft op de vermoeiingssterkte. Het aanbrengen van een zwarte laag door spuiten is tamelijk riskant, enerzijds omdat zo'n laag op den duur kan loslaten of in hoogvacuüm gassen kan afgeven, anderzijds omdat hij door vergroting van de ontwikkelde warmte (door diëlektrische verliezen) ook een averechts effect kan hebben.

Er werd daarom besloten, de warmteafvoer niet door straling maar door koeling met stromend water te bewerkstelligen. Daartoe moesten koelpijpen aan de voet van de stemvork worden aangebracht. Nu moest echter gelet worden op een ander gevaar. Door de eenzijdige koeling ontstaat in de stemvork een temperatuurverval, dat door ongelijkmatige uitzetting en daarbij optredende mechanische spanningen kan leiden tot kromtrekken van de bladen. Dit zou ernstige gevolgen kunnen hebben voor de optredende capaciteitsvariaties en voor de werking van de positieregeling (zie het volgende hoofdstuk). Er werd daarom eerst nog een onderzoek ingesteld over de te verwachten temperatuurverdeling en vormverandering van elk der bladen.

Men kan de temperatuurverdeling met goede benadering berekenen door het profiel van de stemvork weer te beschouwen als een rechte afgeknotte wig, waarvan ook bij de vormgeving werd uitgegaan (fig. 9), met een lengte gelijk aan de weg waarlangs de warmtestroming naar de koelpijpen plaats heeft. Dit temperatuurverloop is in *fig. 19* weergegeven.

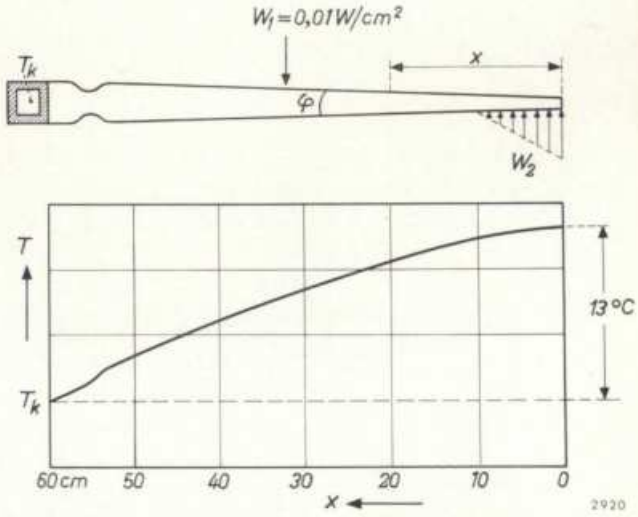


Fig. 19. Verloop van de temperatuur T over het profiel van een blad van de stemvork, berekend door dit profiel te beschouwen als een rechte afgeknotte wig, met een versmalling ter plaatse van de steel van de stemvork. Vanaf het buitenoppervlak gaat een vermogen W_1 (= 0,01 W/cm²) naar binnen, vanaf het binnenoppervlak een vermogen W_2 (ter plaatse van de stator). De voet van de stemvork wordt door een koelwaterpijp op de temperatuur T_k gehouden.

Het is hierin nog gecorrigeerd voor de versmalde doortocht die de warmtestroom bij de steel van de stemvork ter beschikking heeft, en er is rekening gehouden met de warmteontwikkeling aan de binnenkant der bladen ter plaatse van de stator, die in de hierboven weergegeven berekening van het vermogen nog niet was verdisconteerd. *Fig. 20* toont de warmtestroom- en equitemperatuurlijnen. (Het tekenen van zulk een schets volgens eenvoudige regels van de veldentheorie [2]) kan men op het oog

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

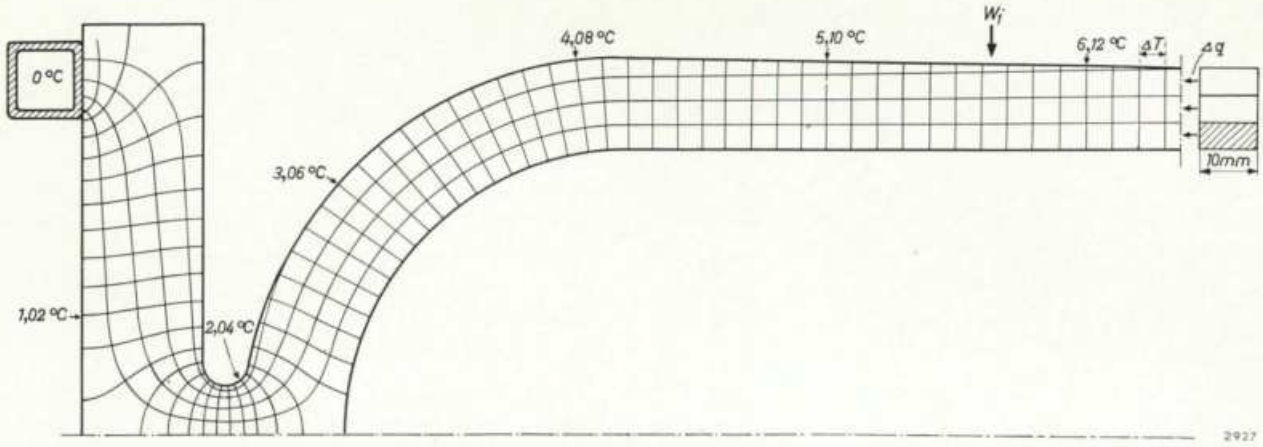


Fig. 20. Schets van de warmtestroom- en equitemperatuurlijnen in het profiel van een blad van de stemvork (alleen het gekromde stuk is weergegeven, in het rechte stuk is het verloop triviaal). Per getekende stroombuis (rechts in dwarsdoorsnede gearceerd) stroomt een vermogen Δq van 0,14 W. Daar hier alleen de temperatuurverschillen van belang waren, is de temperatuur in de koelwaterpijp (links boven) = 0 °C gesteld.

doen, en met enige oefening en geduld gaat dit zo goed dat men er vaak even nauwkeurig als uit de berekening, en in aanmerkelijk minder tijd dan met een elektrolytische trog of derg., het temperatuurverloop mee kan afleiden.) Het resultaat is, dat er tussen voet en lippen geen groter temperatuurverschil dan 13 °C te verwachten was. Wat de hierdoor veroorzaakte vormveranderingen betreft, kon slechts het experiment met een stemvork op ware grootte uitsluitsel geven. Voor dit experiment werd de (niet trillende) stemvork in lucht opgesteld en aan de voet door de koelpijpen op kamertemperatuur gehouden, terwijl hij over zijn gehele oppervlak kunstmatig werd verwarmd door middel van stroken elektrisch geleidend papier, die met een isolerende onderlaag van dun nylondoek op het buitenoppervlak van de bladen waren geplakt (*fig. 21*). Door voeding van elk der stroken met een geschikte stroom kon het theoretisch afgeleide temperatuurverloop vrij goed nagebootst worden. Het bleek dat de lippen der

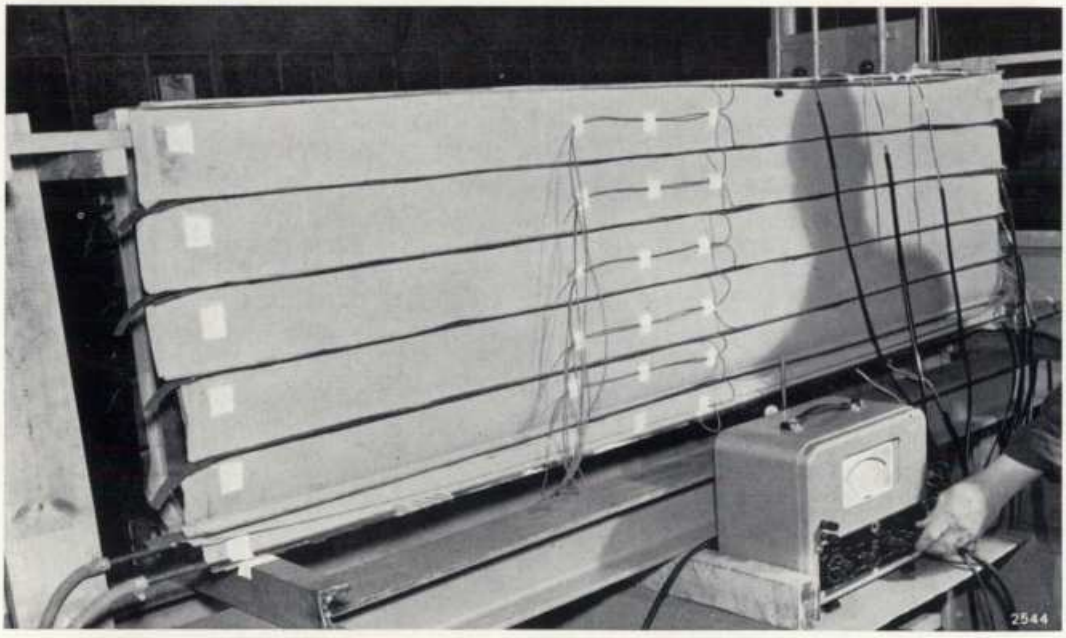


Fig. 21. Proefopstelling voor het meten van de in de praktijk te verwachten deformaties van de stemvork door de verwarming, bij eenzijdige afkoeling met stromend water. De berekende temperatuurverdeling wordt bij benadering gerealiseerd met behulp van verwarming door opgeplakte stroken elektrisch geleidend papier, ieder gevoed met een bepaalde stroom.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

bladen minder recht en evenwijdig waren dan bij een uniforme temperatuurverhoging van de stemvork. De afwijkingen waren niet goed reproduceerbaar, vermoedelijk door allerlei mechanische restspanningen in de gewalste en verder bewerkte platen, maar ze bleken zo klein te zijn (ten hoogste $\pm$ 0,2 mm) dat er geen onaangename gevolgen van te duchten waren.

Fig. 22 toont de stemvork, gemonteerd aan de stub, waarbij de flexibele aansluitingen voor de koelpijpen langs de voet van de stemvork goed zijn te zien.

Er zij nog op gewezen dat in het voorgaande altijd de temperatuurverdeling in de toestand van stationaire warmtestroming is beschouwd. Voor de tijdconstante van het proces van warmworden en afkoelen van de stemvork berekenden we ca. 1700 seconden. Dit betekent dat ongeveer een half uur na inschakelen van het cyclotron de temperatuur van ieder punt van de stemvork $\frac{2}{3}$ van de eindwaarde heeft bereikt.

Fig. 22. Rechts de stemvork, hier reeds opgehangen aan de stub, waarvan de bovenbeplating is verwijderd. Men ziet de flexibele verbindingen voor de koelwaterpijpen die tegen de voet van de stemvork zijn bevestigd. Ook het aandrijfmechanisme is goed te zien, en de drie assen die de ophangpunten verbinden met de servomotoren voor de positieregeling (zie fig. 25).

De automatische positieregeling van de stemvork

We hebben in de inleiding reeds gewezen op de merkbare deformaties die in het gehele hoogfrequentiesysteem optreden als het cyclotron werkt, en op het feit dat de juiste positie van de stemvork ten opzichte van de stator gehandhaafd moet blijven, ongeacht de genoemde deformaties. Er zijn tweeërlei veranderingen in de onderlinge positie mogelijk: veranderingen van de overlapping van stemvork en stator, die nominaal over de hele breedte precies 10 cm bedraagt; en veranderingen van de „spleet", waaronder we willen verstaan de afstand waartoe de trillende bladen de stator, op welke plaats dan ook, naderen. In het ideale geval zijn de positie èn de trillingsamplitude zo geregeld dat de spleet overal 1,5 mm bedraagt.

De relatieve verplaatsingen in horizontale richting, die door de deformaties worden veroorzaakt, zijn van de orde van grootte van 1 mm. Ze beïnvloeden echter vrijwel niet de spleet doch alleen de overlapping, hetgeen in de capaciteitsvariatie hoegenaamd niet merkbaar is. Voor wat betreft de onderlinge positie van stemvork en stator in horizontale richting, werd derhalve een eenmalige instelling tijdens het inbouwen van de modulator in de installatie te Genève voldoende geacht. Om deze instelling te vergemakkelijke, zijn de drie ophangpunten van de stemvork aan sleden bevestigd, die 5 mm verschoven kunnen worden (fig. 22).

De relatieve verplaatsingen die wèl veranderingen van de spleet veroorzaken, kunnen we analyseren in drie bewegingen (zie *fig. 23*): *a*) verplaatsing van de stemvork in verticale richting; *b*) draaiing van de stemvork om een as evenwijdig met de lippen; *c*) draaiing van de stemvork om de hartlijn van het gehele hoogfrequentiesysteem. Hieraan kunnen we nog toevoegen *d*) een foutieve trillingsamplitude van de stemvork. Ter correctie van de uit de afwijkingen voortvloeiende spleetveranderingen was het noodzakelijk, de in de inleiding reeds vermelde automatische positieregeling in te voeren. Deze werkt met drie servomotoren, die respectievelijk de drie ophangpunten in verticale richting verplaatsen (draaiing van de kniestukken om de asjes a_1, a_2, a_3 in fig. 2). Door de servomotoren op geschikte wijze afzonderlijk of tegelijk te bekrachtigen, kan men de

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

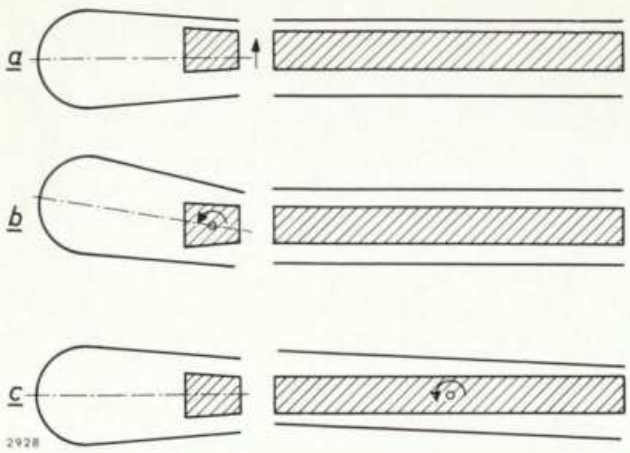


Fig. 23. De verschillende fouten die kunnen optreden in de relative positie van de stemvork ten opzichte van de stator. De pijltjes geven de vereiste correctie aan.
a) Verplaatsing in verticale richting.
b) Draaiing om een as evenwijdig met de lippen.
c) Draaiing om de hartlijn van het hoogfrequentiesysteem.

drie genoemde soorten bewegingen *a-c* tot stand brengen en compenseren. Deze drie servomotoren zijn op de titelfoto van deel I op het voorvlak van de stubtank te zien. Met een vierde servomotor, aan welks as een potentiometer is gekoppeld die de bekrachtigingsstroom van de stemvorkaandrijving beinvloedt, wordt de trillingsamplitude van de stemvork op de juiste waarde gehouden (*d*).

Voor de besturing van de vier servomotoren dient een regelapparatuur, die in grote trekken als volgt werkt. De situatie wat betreft de spleet tussen stemvork en stator wordt verkend door tastorganen, die aan de stator zijn bevestigd. Daaruit steken in totaal vijf taststiften van „Teflon" (*fig. 24*), die, wanneer ze door de stemvork worden geraakt, ieder een stroomvoerend contact verbreken. Drie stiften staan vlak bij de stator (twee hiervan zijn in fig. 24 te zien, de derde staat aan het ca. 2 m verwijderde andere eind van de stator). Deze drie stiften kunnen van tijd tot tijd, op „commando" van de regelapparatuur, door een elektromagneetje verder uit hun metalen omhulsel worden geschoven, in twee stapjes van 0,1 mm. Wordt één dezer stiften reeds in zijn ruststand geraakt, dan stelt de regelapparatuur onmiddellijk de modulator en de oscillator buiten werking. In dat geval is namelijk de spleet minder dan 1,4 mm, hetgeen mechanisch en elektrisch gevaarlijk werd geacht. Raakt de stemvork één der drie stiften aan na het eerste, of na het tweede stapje, of in het geheel niet, dan bedraagt de spleet daar ter plaatse respectievelijk tussen 1,4 en 1,5 mm, tussen 1,5 en 1,6 mm, en meer dan 1,6 mm. De 27 mogelijke signaalcombinaties beantwoorden aan verschillende soorten afwijkingen van de gewenste situatie, nl. van het type *a* of *c* (of *d*) of combinaties daarvan. Door middel van een „vertaler" in de regelapparatuur stelt ieder van de signalen telkens een kort ogenblik die combinatie van de servomotoren in werking die tot opheffing van de desbetreffende afwijking van de gewenste situatie leidt.

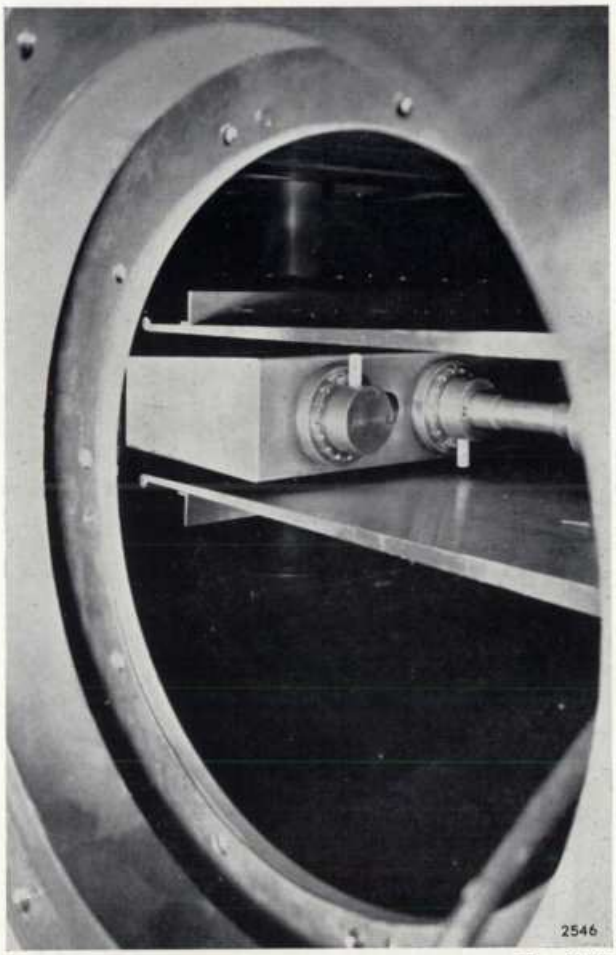


Foto CERN

Fig. 24. Einde van stemvork en stator, gemonteerd in het cyclotron en gezien door een venster in de versnellingskamer. Men ziet twee van de vijf taststiften van „Teflon", die op de stator zijn bevestigd en die dienen om de positie en amplitude van de stemvork te verkennen.

De beide nog niet besproken „Teflon" taststiften bevinden zich 100 mm verder van de stator dan de eerste drie. Wordt één van beide geraakt, dan stelt de „vertaler" — afhankelijk van de informatie die de eerste drie stiften geven — zodanige servomotoren in werking dat afwijkingen van het type *b* of *d* gecorrigeerd worden.

Een zeer vereenvoudigd blokschema van de regelapparatuur geeft *fig. 25*, een foto van de rekken waarin zij is ondergebracht toont *fig. 26*. In het schema is ook aangegeven de eerder besproken frequentieregeling voor het aandrijfmechanisme van

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

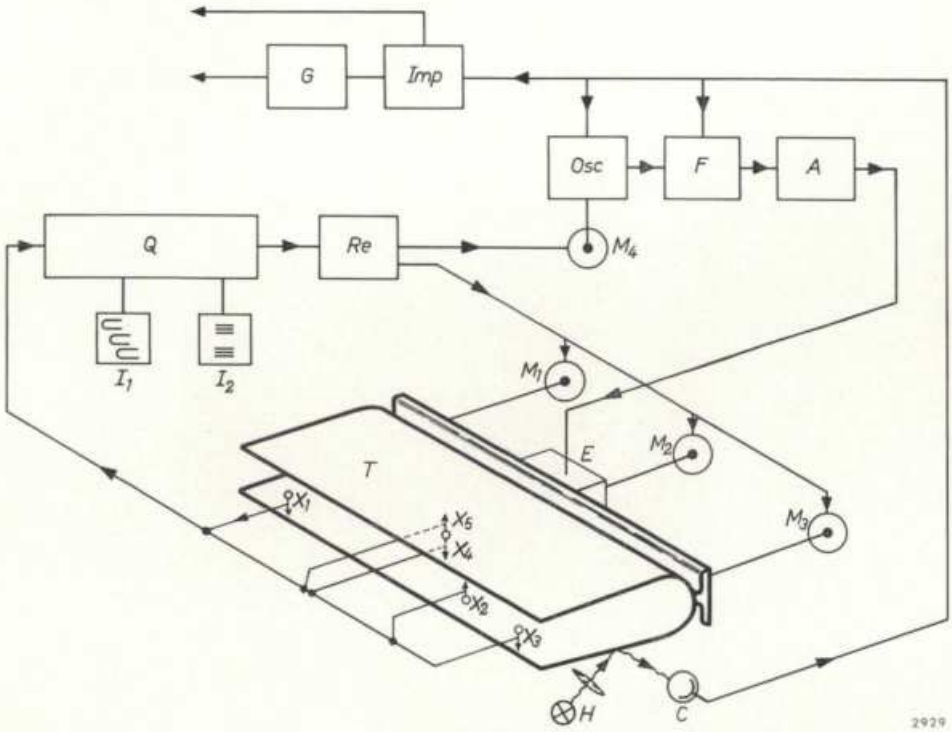


Fig. 25. Schema van de apparatuur voor automatische regeling van positie en amplitude van de stemvork. X_1-X_5 taststiften, die aan de stator zijn bevestigd en die de situatie van de stemvork verkennen. *Q* „vertaler", die via een serie relais *Re* de juiste combinatie van de vier servomotoren M_1-M_4 in werking stelt voor het eventueel corrigeren van de situatie. I_1 en I_2 visuele indicaties. De drie motoren M_1-M_3 werken op de ophanging van de stemvork *T*, M_4 werkt op een potentiometer die de voeding van het aandrijfmechanisme *E* regelt. *Osc* *RC*-oscillator, *F* fazeregelcircuit en *A* versterker voor de aandrijving. *H* lampje en *C* fotocel, die het terugkoppelsignaal leveren voor de frequentieregeling van de aandrijving. Tevens kan dit signaal de impulsgenerator *Imp* synchroniseren, die de hoogfrequentiegenerator van het cyclotron en (via *G*) de ionenbron en bestralingsopstellingen bestuurt.

de stemvork, die mede voor de synchronisatie van alle betrokken delen van het cyclotron dient [9]).

Proefdraaien

Pas bij de beproeving na de montage in het cyclotron te Genève, of eigenlijk zelfs pas na ettelijke maanden van normaal gebruik van de gehele installatie, kon gezegd worden of het gecompliceerde geheel van de modulator aan de verwachtingen zou voldoen. Er bleken verschillende wijzigingen nodig te zijn. In feite waren reeds wijzigingen nodig gebleken bij de beproeving te Eindhoven, vóór de verzending naar Genève. Bij die beproeving konden de omstandigheden van het werken in het cyclotron alleen tot op zekere hoogte worden nagebootst, nl. wat betreft de plaatsing in vacuüm en de verwarming. De stubtank, die te Genève op de versnellingskamer moest worden aangesloten, werd te Eindhoven, na bevestiging van de stemvork aan de stub (fig. 22), voorlopig afgesloten met een hulpdeksel, waaraan de stator met ingebouwde tastorganen was bevestigd en dat voorzien was van vensters om de bewegingen te kunnen gadeslaan (*fig.* 27). De stemvork werd verwarmd door een twaalftal 2 meter lange warmtestralers (opplakken van verwarmings-

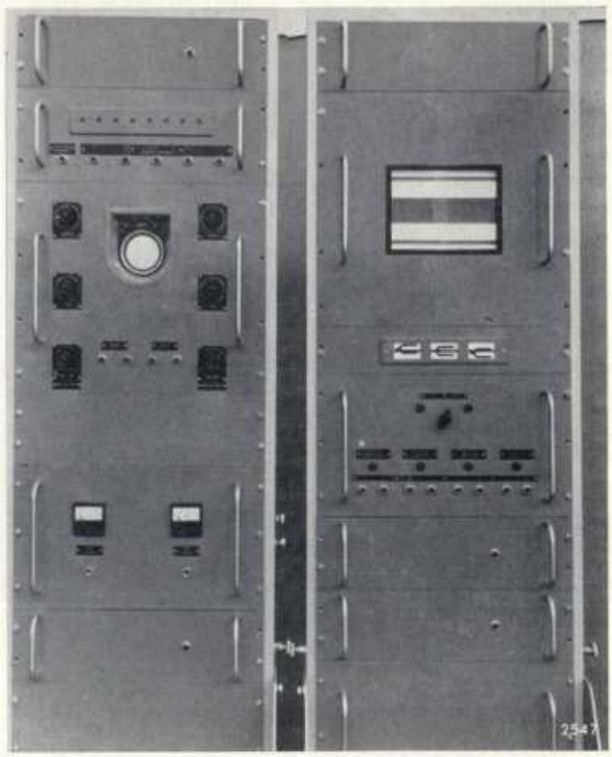


Fig. 26. Deel van de rekken met de regelapparatuur voor de stemvork. Op het rechter rek ziet men de visuele indicaties voor bepaalde afwijkingen van de juiste situatie van de stemvork: bovenaan voor de afwijking *c*, in het midden voor de afwijking *a*, zie fig. 23.

[9]) De stemvork-modulator in zijn definitieve vorm is, evenals het gehele hoogfrequentiesysteem van dit cyclotron, gebouwd door een afdeling van de hoofdindustriegroep P.I.T. (Produkten voor Industriële Toepassingen) van Philips te Eindhoven, onder leiding van L. van Mechelen. Van de medewerkers van deze afdeling noemen we in het bijzonder A. de Groot, thans bij CERN te Genève, die een belangrijk aandeel heeft gehad in de ontwikkeling van de regelapparatuur voor de stemvork en van de gehele elektronische apparatuur voor het hoogfrequentiesysteem.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

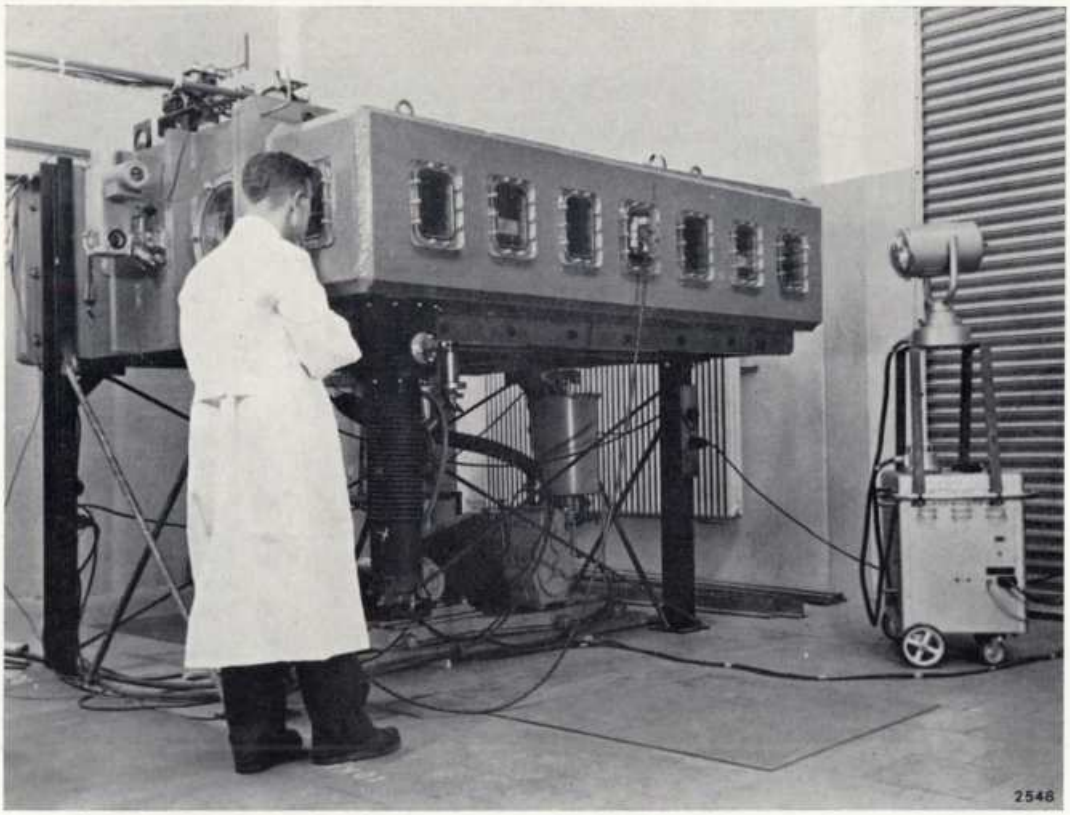


Fig. 27. Proefdraaien van de modulator te Eindhoven. De stubtank, met erin gemonteerde stemvork, is aan de zijde waar later de Dee-hals zal aansluiten, voorlopig gesloten met een vacuümdicht hulpdeksel met vensters. Rechts een stroboscoop voor het gadeslaan van de trilling van de stemvork.

stroken, zoals hierboven voor het deformatie-onderzoek beschreven, was bij de trillende stemvork natuurlijk niet mogelijk wegens de demping die het zou veroorzaken) en aan de voet door koelwater op kamertemperatuur gehouden. Bij het trillen van de stemvork bleek het nodig de stub aan de achterzijde met een blok lood van ongeveer 60 kg te verzwaren, omdat de stub samen met zijn ondersteuningsisolatoren vrij sterk ging meetrillen, door een resonantie in de buurt van 50 Hz. De amplitude van de lippen, gemeten met stroboscoop en kathetometer, toonde plaatselijke verschillen tot ca. 0,3 mm. Deze afwijking van de rechtheid der lippen kon door bevestiging van enkele gewichtjes van 10 gram op de ribben nog verminderd worden tot ca. 0,15 mm.

In Genève echter traden nog andere complicaties op, met name door het spreidingsveld van de grote elektromagneet van het cyclotron. De verplaatsingen van stemvork en stator bij het inschakelen van de magneet bleken gelukkig mee te vallen. Verschillende onderdelen, zoals de tastorganen en filters van de regelapparatuur, die zich in het spreidingsveld bevinden, moesten beter hiertegen afgeschermd worden. De onaangenaamste verrassing echter die het proefdraaien van het complete synchrocyclotron bracht — waarbij alleen de ionenbron niet in werking werd gesteld, omdat natuurlijk geen deeltjesbundels geproduceerd mochten worden zolang nog personen binnen de betonnen afscherming bezig moesten zijn —, waren de energieverliezen in de stemvork. Oorspronkelijk was geschat dat ter dekking van de verliezen door demping ongeveer 15 W nodig zou zijn, waarbij eventueel een zelfde bedrag kon komen voor de koper- en ijzerverliezen van de elektromagneet. Bij het proefdraaien in Eindhoven, zonder elektrisch en magnetisch veld, was gebleken dat de demping slechts 3 W opslokte en de verliezen in de elektromagneet slechts 4 W bedroegen. Het leek dus dat het, voor ca. 30 W geconstrueerde, aandrijfmechanisme ruim voor zijn taak berekend was. Bij het proefdraaien in Genève echter nam het aandrijfmechanisme in totaal 45 W op! De oorzaak hiervan bleek te zijn een extrademping door wervelstromen, die in de bladen van de stemvork optraden ten gevolge van een vrij sterke horizontale component van het magneetveld daar ter plaatse. Een dergelijke component van die sterkte hadden we niet voorzien.

Ter vermindering van de horizontale magneetveldcomponent werd een hulpwikkeling om de stubtank aangebracht, met 10 windingen en een stroom

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van 400 A. De wervelstroomverliezen daalden hierdoor tot ca. 6 W en het totale door de elektromagneet opgenomen vermogen tot ca. 30 W.

De hoogfrequente spanning tussen stator en stemvork (variërend tussen 8 en 25 kV, zie boven) bleek geen overslagen ten gevolge te hebben. Om eventuele zwervende ionen, die ontladingen kunnen inleiden, te vangen, worden stator en stemvork op een potentiaal van resp. —2200 en —800 V ten opzichte van aarde gebracht.

Het verlopen van minimale en maximale frequentie ten gevolge van de verwarming van de stemvork bleek zeer gering te zijn. De machine kan ook uren achtereen werken zonder dat de positieregeling in werking behoeft te treden. De amplituderegeling treedt vaker in werking; de oorzaak hiervoor is niet geheel duidelijk.

De modulator heeft nu ongeveer drie jaar gewerkt. Aangezien men aanvankelijk niet wist of de stemvork wel zou voldoen, was door de CERN voor alle gevallen ook een modulator met roterende condensator ontwikkeld en gebouwd. Deze is echter ongebruikt gebleven. De eerste stemvork heeft zijn geraamde levensduur ruim overschreden, de tweede blijft als reserve dienen, zodat men nu een derde exemplaar heeft laten fabriceren.

Samenvatting. De frequentie van de versnellingsspanning van het CERN-synchrocyclotron zwaait periodiek van 29 tot 16,5 MHz. Deze frequentiemodulatie wordt verkregen door een met 55 Hz trillende condensator, die in het Philipslaboratorium te Eindhoven in samenwerking met de CERN is ontwikkeld. De condensator bestaat uit een ca. 60 cm lange en 2 meter brede aluminium „stemvork" en een even brede, aan de Dee-hals bevestigde, stator. De zeer grote vereiste trillingsamplitude van de bladen der stemvork (1,25 cm) brengt bij een resonantiefrequentie van 55 Hz buigspanningen mee die aan de grens van het toelaatbare liggen. Door keuze van een afgeknotwigvormig profiel voor elk der bladen kon in dit opzicht een voldoende veiligheid worden verkregen (levensduur op zijn minst 10^9 trillingen). De stemvork wordt in trilling gebracht door een elektromagnetische aandrijving met hulpmassa, zonder vast steunpunt. Hierdoor worden vrijwel geen trillingen op de omgeving overgebracht. De aandrijving wordt gevoed uit een *RC*-oscillator voor 27,5 Hz en een versterker met zodanig vervormde uitgangswisselstroom dat de aandrijvende kracht (magnetische aantrekking) vrijwel sinusvormig verloopt. De *RC*-oscillator wordt gesynchroniseerd door een terugkoppelsignaal, dat de trillende stemvork produceert door wisselende reflexie van een lichtbundeltje. De elektromagneet van de aandrijving neemt ca. 30 watt op. Bij het proefdraaien in het cyclotron bleek dit vermogen eerst veel groter te zijn, ten gevolge van een demping van de stemvork door wervelstromen in de bladen, veroorzaakt door een onverwacht grote horizontale component van het spreidingsveld van de grote cyclotronmagneet. Deze component is door een wikkeling met 10 windingen en een stroom van 400 A zo goed mogelijk gecompenseerd. De bladen van de stemvork kunnen behalve in de gewenste grondtrilling, waarbij de „lippen" recht blijven en evenwijdig met de stator, ook in hogere trillingsvormen trillen (die door Chladni-figuren zichtbaar werden gemaakt). Bij het warmworden van de stemvork door de hoogfrequente stroom bleek toevallig de eigen frequentie van een dezer hogere trillingsvormen te coïncideren met een geheel veelvoud van 55 Hz, zodat deze vorm geëxciteerd werd. De coïncidentie is opgeheven door aanbrengen van een verstijvingsrib van bepaalde afmetingen op elk der bladen (waarbij gezorgd moest worden dat geen nieuwe, soortgelijke coïncidenties optraden). De in de stemvork door de stroom ontwikkelde warmte (ca. 250 watt) wordt afgevoerd door koeling van de voet van de stemvork met water; koeling door straling — het enige alternatief, daar de stemvork in vacuüm is opgesteld — zou tot te hoge temperaturen leiden. De eenzijdige koeling brengt het gevaar van kromtrekken mede. Dit werd vooral experimenteel onderzocht door de, uit berekeningen afgeleide, te verwachten temperatuurverdeling na te bootsen met behulp van plaatselijke verhittingselementen en dan de vormveranderingen te meten. De „lippen" bleken binnen ca. 0,2 mm recht te blijven. De positie van de, aan drie metalen banden opgehangen, stemvork en de amplitude moeten bij het trillen op ca. 0,1 mm nauwkeurig gehandhaafd worden. Hiertoe zijn aan de stator vijf taststiften aangebracht, waarmee men de situatie kan verkennen. De stiften leveren signalen, die via een „vertaler" en relais geschikte combinaties van vier servomotoren in werking stellen, waardoor de amplitude bijgeregeld en/of de drie ophangpunten op de juiste wijze verplaatst worden.

Het eerste exemplaar van de stemvork heeft ongeveer drie jaar tot tevredenheid gewerkt en zijn geraamde levensduur ruimschoots overschreden.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

OVERZICHT VAN RECENTE WETENSCHAPPELIJKE PUBLIKATIES DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

Van deze publikaties, voor zover niet met een sterretje * gemerkt, verstrekt de Administratie van Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven, op aanvraag overdrukken.

2716: J. F. Schouten: De beoordeling van perceptieve en selectieve belasting (T. soc. Geneesk. **37**, 393-395, 1959, no. 10).

In industriële processen wordt de mens steeds minder als energiebron en steeds meer als selecterend orgaan te werk gesteld. Analysering van het menselijk selectief arbeidsvermogen is daarom gewenst. Hierbij moet aandacht worden besteed aan de samenhang met tempo, scholing en vermoeidheid, zowel bij het aanleerproces als in het gestabiliseerde arbeidsproces. Een voorbeeld van een proef die in het Instituut voor Perceptieonderzoek te Eindhoven ten behoeve van deze analyse is ontwikkeld, en die betrekking heeft op het monteren van pennen in gaten, geeft enig inzicht in de wijze waarop een dergelijk onderzoek kan worden opgezet.

2717: O. Reifenschweiler: A suitable tritium carrier for gas discharge tubes (Proc. 2nd United Nations int. Conf. on the peaceful uses of atomic energy, Genève, 1-13 sept. 1958, vol. 19, blz. 360-362).

Tritium is een bètastraler met zeer aantrekkelijke eigenschappen om dienst te doen ter vergemakkelijking van de ontsteking van gasontladingen. Om het tritium in de ontladingsruimte aan te brengen op de plaats waar men het wenst, heeft de auteur het tritium gebonden aan titaniumpoeder, dat zeer goed tritium absorbeert. Een suspensie van het poeder met een binderoplossing wordt met een penseel op de juiste plaats aangebracht. Om te voorkomen dat de geëmitteerde elektronen door het poeder zelf worden geabsorbeerd, moet het poeder uiterst fijn zijn. De wijze waarop men een dergelijk fijn poeder (korrelgrootte ca. 200 Å) kan bereiden, wordt in het artikel beschreven.

2718: J. L. Meijering en M. L. Verheijke: Oxidation kinetics in the case of aging oxide films (Acta metallurgica **7**, 331-338, 1959, no. 5).

Hauffe en Kofstad hebben gevonden dat bij oxydatie van Cu_2O tot CuO bij temperaturen tussen 800 en 1000 °C de dikte van de CuO-laag evenredig is met de derdemachtswortel uit de tijd. De evenredigheidsfactor bleek vrijwel onafhankelijk van de temperatuur. Proeven van de auteurs hebben deze resultaten bevestigd. Uit speciale experimenten is gebleken dat verouderingsverschijnselen in de CuO-laag voor dit gedrag verantwoordelijk zijn. Voor het geval dat de permeabiliteit van de gevormde oxydelaag (of de reciproke waarde ervan) een exponentiële functie van de tijd is, worden reactiekinetische berekeningen uitgevoerd.

2719: K. W. van Gelder: Fabricagebeheersing, II. Het aanhouden van toleranties (Sigma **5**, 33-38, 1959, no. 2).

Vervolg van no. **2702**. In dit tweede artikel behandelt de auteur welke consequenties het handhaven van de vastgestelde toleranties heeft voor de werkplaats en voor de controle. Ten slotte is getracht het verband tussen kwaliteit en kosten te leggen op een manier die voor de praktijk bruikbaar is.

2720: J. J. Arlman en H. N. L. Hoevenaar: Een niveaudetector voor de praktijk (Ingenieur **71**, Ch 8-Ch 9, 1959, no. 19).

Beschrijving van een eenvoudige methode om de stand van een vloeistofniveau in een gesloten cilinder (b.v. CO_2 in een stalen cilinder) te bepalen. Aan de ene zijde van de cilinder houdt men een preparaat van radioactief ^{137}Cs, aan de andere zijde wordt de γ-straling gedetecteerd met een getransistoriseerde stralingsmonitor (zie Philips techn. T. **21**, 216-221, 1959 (no. 7)). Een belangrijke toepassing is de snelle controle van CO_2-brandblusinstallaties aan boord van schepen, waar het tijdrovende demonteren en wegen der CO_2-cilinders vervalt. Getoond wordt hoe men uit de bepaling van het vloeistofniveau de inhoud van CO_2-cilinders in kg kan bepalen.

2721: B. Combée en P. J. M. Botden: De mogelijkheden van teleröntgendiagnostiek, zoals bedreven in Jean Talon Hospital, Montreal (J. belge Radiol. **42**, 79-86, 1959, no. 1).

De röntgenbeeldversterker maakt het mogelijk met behulp van een eenvoudig te bedienen televisiecamera de röntgendiagnostiek in het daglicht uit te voeren. Zowel bescherming van de röntgenoloog tegen straling als de belasting van de patiënt met straling wordt gunstiger. Beschreven wordt een installatie, opgesteld in het Jean Talon Hospital te Montreal.

2722: W. Verweij en M. H. A. van de Weijer: New sodium lamps (Beschikbaar als voordruk; verschijnt in: Comptes Rendus C.I.E., 14e session, Brussel 1959).

Wegens de toenemende concurrentie die natriumlampen ondervinden van andere lichtbronnen, zijn pogingen aangewend de constructie van natriumlampen eenvoudiger en daardoor goedkoper te maken. De ontwikkeling gaat in de richting van lampen met een vaste vacuümmantel. De bezwaren die vroeger hiertegen bestonden, zijn geleidelijk overwonnen. Zo beschikt men thans voor de ontladingsbuizen over glassoorten die niet verkleuren door de inwerking van natriumdamp. Een losse vacuümmantel, die telkens opnieuw gebruikt kan worden, heeft daardoor zijn aantrekkelijkheid verloren. Door een goede dimensionering en een juist gekozen vulling met edelgas is een goede thermische stabiliteit bereikt. Enige kleine uitstulpingen, verdeeld over de ontladingsbuis, bewerken een gelijkmatige verdeling van het in de afkoelende lamp condenserende natrium en verhinderen het ontstaan van natriumspiegels. De edelgasvulling wordt zo gekozen dat geen ontstekingsmoeilijkheden als gevolg van verdwijning van het edelgas voorkomen. Er zijn lampen in de nieuwe uitvoering gemaakt van 45, 60, 85 en 140 W, die verwisselbaar zijn met de oude lampen van deze vermogens. Bovendien wordt een prototype van een lamp van 250 W beschreven.

2723: K. van Duuren en G. J. Sizoo: The gas-discharge mechanism for the argon-alcohol proportional counter (Appl. sci. Res. **B 7**, 379-399, 1959, no. 5).

Bij een aantal proportionele tellers, gevuld met een mengsel van argon en alcohol (9 : 1), tot drukken die varieerden van 67 tot 220 mm Hg, en voorzien van draadanodes met diameters die varieerden van 0,03 tot 1 mm, werd de gasvermenigvuldigingsfactor A nauwkeurig gemeten. Uit de metingen werd ook de ionisatiecoëfficiënt afgeleid. Het bleek dat in enkele gevallen het thermische evenwicht tussen de elektronen en de gasmoleculen enigszins was verstoord. De voorwaarden voor het optreden van deze verstoringen konden worden opgespoord. De gemeten waarden van A wijken aanzienlijk af van de door Rose en Korff berekende waarden. Vergelijking van de experimenteel gevonden waarden van de ionisatiecoëfficiënt van het argon-alcoholmengsel met vroeger bepaalde waarden voor zuivere argon en zuivere alcohol verschaft inzicht in het mechanisme der elektronenvermenigvuldiging in het mengsel.

2724: J. M. Stevels en A. Kats: Défauts de réseau dans le quartz cristallin et la silice fondue (Compte-rendu XXXIe Congrès int. Chim. industr., Luik, sept. 1958, deel II, blz. 125-128, Mercurius, Antwerpen).

In de silicium-zuurstofroosters van kristallijn kwarts en van kwartsglas komen vrijwel altijd roosterfouten voor, veroorzaakt door vacatures en/of verontreinigingen. De verontreinigingen zijn dikwijls in zo geringe concentratie aanwezig dat men ze chemisch moeilijk kan aantonen. Door de dielektrische verliezen, het absorptiespectrum en de paramagnetische resonantie vóór en na bestraling met röntgenstralen of met snelle neutronen te meten, kan men conclusies trekken over de wijze waarop de verontreinigingen in het rooster zijn opgenomen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

2725: K. van Duuren en J. Hermsen: Improved design for halogen-quenched end-window Geiger counters (Rev. sci. Instr. **30**, 367-368, 1959, no. 5).

Geigertellers met een venster aan één der uiteinden vertonen zekere bezwaren, die men kan ondervangen door de constructie te wijzigen. Het artikel geeft voorbeelden van dergelijke gewijzigde constructies.

2726: N. W. H. Addink en L. J. P. Frank: Remarks apropos of analysis of trace elements in human tissues (Cancer **12**, 544-551, 1959, no. 3).

De verandering van het zinkgehalte van het bloed van kankerpatiënten geeft aanwijzingen omtrent de vooruitgang of de verergering van de toestand van de patiënt. Dit is bevestigd door een onderzoek van 164 patiënten, waarbij het oordeel van de behandelende arts en het resultaat van het laboratoriumonderzoek met elkaar werden vergeleken. In 80-90% van de gevallen bestond er overeenstemming tussen de beide beoordelingsmethodes. Van 31 der onderzochte patiënten worden details van het ziekteverloop gegeven.

2727: J. Hornstra: Models of grain boundaries in the diamond lattice, I. Tilt about <110> (Physica **25**, 409-422, 1959, no. 6).

Het is bekend dat de grenzen tussen kristallieten met een klein verschil in oriëntatie bestaan uit een samenstel van dislocaties. In dit artikel wordt aangetoond dat dit voor het diamantrooster ook geldt als de twee kristallieten ten opzichte van elkaar om een <110>-richting zijn gedraaid over een willekeurig grote hoek en langs een vlak evenwijdig met de as van draaiing zijn samengegroeid (Engels: tilt boundary). Voor kristalgrenzen van deze soort kan met dislocaties een model worden geconstrueerd dat slechts geleidelijk verandert met de hoek van draaiing. Ook de tweeling volgens {111} behoort tot deze reeks; in dit geval komt het model overeen met de bekende structuur van dit tweelingsvlak. Deze tweeling kan echter ook worden beschreven als ontstaan door draaiing over 60° om een as loodrecht op het grensvlak (Engels: twist boundary). In dit geval verwacht men een netwerk van schroefdislocaties, doch ook dit model is identiek met de algemeen aanvaarde structuur van het tweelingsvlak.

2728: M. J. Sparnaay: Van der Waals forces and fluctuation phenomena (Physica **25**, 444-454, 1959, no. 6).

Afleiding van een uitdrukking voor de aantrekking tussen twee elektrisch neutrale systemen, allebei bestaande uit elektrische puntladingen die ongeordend bewegen binnen bolvormig begrensde ruimten. De berekening is gebaseerd op het gebruik van de middelbare waarden der dichtheidsfluctuaties in de twee systemen. Resultaat en methode worden vergeleken met de door Keesom afgeleide uitdrukking voor de wisselwerking tussen dipolen en met de uitdrukking die geldt voor twee klassieke harmonische oscillatoren op grote afstand van elkaar.

2729: P. H. J. A. Kleijnen: Travelling-wave-buizen (T. Ned. Radiogenootschap **24**, 71-88, 1959, no. 2/3).

Grondslagen van de theorie der lopendegolfbuis in haar verschillende uitvoeringsvormen. Het artikel bevat de inhoud van een inleidende voordracht gehouden op het symposium over lopendegolfbuizen dat door het Nederlands Radiogenootschap in 1958 werd georganiseerd.

2730: C. T. de Wit: Een 10-watt-lopendegolfbuis voor de 7,5-cm-band (T. Ned. Radiogenootschap **24**, 89-100, 1959, no. 2/3).

Bespreking van de belangrijkste factoren die een rol spelen bij het ontwerp en de uitvoering van een lopendegolfbuis met een hoog bundelrendement. De dimensionering van verschillende onderdelen van de buis en van het circuit wordt in grote lijnen aangegeven.

2731: A. Versnel: Lopendegolfbuizen met een laag ruisgetal (T. Ned. Radiogenootschap **24**, 101-112, 1959, no. 2/3).

In het artikel wordt het gedrag van de stroom- en snelheidsfluctuaties van een elektronenbundel in een lopendegolfbuis behandeld. De berekening wordt in drie stappen uitgevoerd: eerst worden de fluctuaties tussen katode en versnellingsanode beschouwd, daarna de lotgevallen van deze fluctuaties in de driftruimte tussen versnellingsanode en het begin van de spiraal, en ten slotte wordt nagegaan hoe ze zich gedragen als ze in wisselwerking treden met het op de spiraal geënte signaal. Berekent men dan aan de hand hiervan het ruisgetal, dan blijkt dat indien de diameter van de bundel, de snelheid van de bundel in de driftruimte, en de bundelstroom constant gehouden worden, het ruisgetal alleen afhangt van de lengte der driftruimte en van het potentiaalverschil tussen katode en versnellingsanode. Door geschikte keuze van beide wordt het minimale ruisgetal bereikt. Bij een aantal experimentele buizen heeft de schrijver de lengte van de driftruimte elektrisch gevarieerd: de driftruimte op constante spiraalpotentiaal werd voorafgegaan door een driftruimte op variabele potentiaal. Het minimale ruisgetal, gemeten aan lopendegolfbuizen in het 4000-MHz-gebied, is in overeenstemming met de berekende waarde indien verondersteld wordt dat in, resp. voorbij het voor de katode liggende potentiaalminimum geen correlatie aanwezig is of ontstaat tussen de stroom- en de snelheidsfluctuaties van de bundel. Slaagt men erin de elektronen voorbij het potentiaalminimum over een voldoend lange afstand te laten lopen met een gemiddelde snelheid die ongeveer gelijk is aan de snelheidsspreiding in het potentiaalminimum, dan kan berekend worden — en is elders ook experimenteel gevonden — dat lagere ruisgetallen te verwezenlijken zijn.

2732: J. Ubbink: Masers, I (T. Ned. Radiogenootschap **24**, 129-136, 1959, no. 2/3).

Een inleidend artikel over masers. Fysische processen als absorptie, gestimuleerde en spontane emissie worden besproken in samenhang met het bereiken van een inversie van de bezettingsdichtheid van energieniveaus. Deze inversie (het hoogste niveau krijgt de grootste bezetting), die men dikwijls karakteriseert met het begrip „negatieve temperatuur", is essentieel voor de werking van een maser. Besproken wordt waarom magnetische dipoolsystemen gunstiger zijn dan elektrische, en waarom lage temperaturen de maserwerking begunstigen. Het produkt van versterking en bandbreedte van een maser en de ruis ervan worden besproken aan de hand van een vervangingsschema.

2733: T. Kralt, H. D. Moed, E. J. Ariëns en Th. W. J. Hendriksen: Synthesis and pharmacological properties of O-acetylsalicylamides (Rec. Trav. chim. Pays-Bas **78**, 199-206, 1959, no. 3).

Beschrijving van de synthese van 18N-gesubstitueerde O-acetylsalicylamides. Deze verbindingen vertoonden in het algemeen een geringe koortsonderdrukkende en een sterke krampopheffende werking.

2734: T. Kralt, H. D. Moed, E. J. Ariëns en Th. W. J. Hendriksen: Synthesis and pharmacological properties of salicylamides (Rec. Trav. chim. Pays-Bas **78**, 207-214, 1959, no. 3).

Beschrijving van de synthese van 17 N-gesubstitueerde salicylamides. Evenals de in **2733** besproken N-gesubstitueerde O-acetylsalicylamides vertoonden de verbindingen in het algemeen een geringe koortsonderdrukkende en een sterke krampopheffende werking.

2735: A. Venema: The production of ultra-high vacua by means of a diffusion pump (Vacuum **9**, 54-57, 1959, no. 1).

Als men de grensdruk van een diffusiepomp meet, hangt het resultaat niet alleen af van deze pomp, maar ook van de extra-apparatuur waarmee men ten behoeve van de meting de installatie moet uitbreiden. De auteur bespreekt welke samenstelling van het restgas men aan de pompmond kan verwachten, welke factoren de druk ervan bepalen en hoe men deze zo klein mogelijk kan maken. Op grond van deze overwegingen is een pompinstallatie ontworpen die een kwikdiffusiepomp met koelers bevat. In deze installatie is voor de normale gassen een pompsnelheid bij de recipiënt van 5 tot 10 l/s bereikt, en de grensdruk bedraagt minder dan 10^{-12} mm Hg. Zie ook Philips techn. T. **20**, 97-109, 1958.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

2736: W. Kwestroo en H. A. M. Paping: The systems BaO-SrO-TiO_2, BaO-CaO-TiO_2 and SrO-CaO-TiO_2 (J. Amer. Ceram. Soc. **42**, 292-299, 1959, no. 6).

Beschrijving van de vaste fazen die zich bij verhitting op 1400 °C in lucht vormen in de drie ternaire systemen BaO-SrO-TiO_2, BaO-CaO-TiO_2 en SrO-CaO-TiO_2. Behalve vaste oplossingen van componenten met bekende structuren zijn ook enige ternaire verbindingen waargenomen en bestudeerd.

Voor een aantal gevallen worden diëlektrische constanten en verlieshoeken gegeven. Het artikel bevat kristallografische gegevens over de verbindingen $BaCaTiO_4$, $Ba_3Ca_2Ti_2O_9$ en $Ca_3Ti_2O_7$ en van de reeks vaste oplossingen $(Ba,Sr)_2TiO_4$. De bereiding van de nieuwe verbindingen wordt nauwkeurig beschreven.

2737: K. van Duuren, A. J. M. Jaspers en J. Hermsen: G-M counters (Nucleonics **17**, no. 6, 86-94, 1959).

Overzicht van verschillende vormen van geigertellers met een halogeen als doofgas. Beschouwd worden de vorm, eigenschappen (zoals plateau, dode tijd, vertragingstijd, gevoeligheid, eindeffect, lading per impuls enz.) en toepassingsgebieden.

2738: H. B. G. Casimir, J. Smit, U. Enz, J. F. Fast, H. P. J. Wijn, E. W. Gorter, A. J. W. Duyvesteyn, J. D. Fast en J. J. de Jong: Rapport sur quelques recherches dans le domaine du magnétisme aux Laboratoires Philips (J. Phys. Radium **20**, 360-373, 1959, no. 2/3).

Experimentele onderzoekingen en theoretische beschouwingen over de kristalanisotropie van magnetische ijzeroxydes met hexagonale kristalstructuur die barium bevatten en die, al naar de details van hun structuur, met **M**, **W**, **Y** en **Z** worden aangeduid (zie ook Philips techn. T. **18**, 253-262, 1956). Er bestaat een voorkeursrichting voor de magnetisatie die een zekere hoek Θ met de c-as maakt. Afhankelijk van de chemische samenstelling en de temperatuur, kan Θ vele waarden tussen 0 en $\pi/2$ aannemen. Daar de anisotropie om de c-as slechts gering is, heeft men in het algemeen een voorkeurskegel, die in de gevallen $\Theta = 0$ en $\Theta = \pi/2$ ontaardt tot resp. een voorkeursrichting (de c-as) en een voorkeursvlak (basisvlak $\perp$ c-as). Om dit gedrag mathematisch te beschrijven, behoeft men in de reeksontwikkeling voor de kristalenergie als functie van Θ slechts twee termen mee te nemen; d.w.z. men kan volstaan met twee anisotropieconstanten. Een voorkeurskegel treedt op bij betrekkelijk lage temperaturen in kristallen die kobalt bevatten. Er zijn ook materialen waarbij, in verschillende temperatuurgebieden, zich alle drie de gevallen voordoen, dus voorkeursrichting, voorkeursvlak en voorkeurskegel. De geringe anisotropie in het basisvlak is gemeten. In kristallen die slechts driewaardige metaalionen bevatten, kunnen twee van deze ionen worden vervangen door één tweewaardig en één vierwaardig ion. Gebruik van Co als tweewaardig ion bevordert het optreden van een voorkeursvlak. Bij een **Y**-structuur treedt dit ook op zonder kobalt; dit wordt verklaard met behulp van de klassieke dipoolwisselwerking. De anisotropie van de **M**-structuur, waarbij een voorkeursrichting optreedt, kan niet met dipoolwisselwerking worden verklaard; hier is waarschijnlijk spin-baanwisselwerking verantwoordelijk.

In het laatste gedeelte van het artikel wordt de invloed van geleide precipitatie op de eigenschappen van magnetische legeringen besproken. Met een elektronenmicroscoop is aangetoond dat het optreden van een optimale waarde van $(BH)_{max}$ (tot 12×10^6 gauss-oersted) in „Ticonal" („Alnico") dat 34% kobalt bevat, en dat een speciale warmtebehandeling in een magneetveld heeft ondergaan, berust op het bestaan van een precipitaat dat bestaat uit lange, evenwijdige, 100 à 200 Å dikke naalden. In 3%-siliciumblik kan slechts een gunstige walstextuur worden verkregen als het metaal een precipitaat van gunstige samenstelling (b.v. Si_3N_4 of MnS) en van gunstige afmetingen bevat, en mits het precipitaat gunstig over de massa is verdeeld.

2739: F. L. H. M. Stumpers: Interpretation and communication theory (Synthese **11**, 119-126, 1959, no. 2).

Korte uiteenzetting van de analogie tussen het interpreteren van vertaalde of verminkte teksten en het interpreteren van berichten die via een door ruis gestoord kanaal zijn overgebracht. Tevens worden enige statistische methodes besproken die in de communicatietheorie gemeengoed zijn, en die in de laatste jaren ook worden toegepast bij de kwantitatieve behandeling van taalkundige problemen. (Het artikel bevat de inhoud van een lezing die in 1954 is gehouden.)

2740: P. M. Cupido: Some views on automatic control in glass factories (Glastechn. Ber. **32 K**, I/1-I/5, 1959, no. 1).

Na een uiteenzetting van de principes van automatische regeling en van het probleem der stabiliteit wordt de toepassing bij de regeling van glasovens besproken. Automatische regeling is geen wondermiddel dat de gebreken van een slechte ovenconstructie of van een verkeerd bereidingsproces kan verhelpen. Wel geeft automatische regeling, doordat zij reproduceerbare omstandigheden garandeert, een betrouwbare grondslag voor de bestudering van het proces en voor het zoeken naar verbeteringen.

2741: A. M. Kruithof en A. L. Zijlstra: Different breaking strength phenomena of glass objects (Glastechn. Ber. **32 K**, III/1-III/6, 1959, no. 3).

Overzicht van de mechanische sterkte van verschillende glazen voorwerpen. Omdat niet alleen dunne glasdraden, maar ook massieve glazen voorwerpen zeer grote sterkten (200 kg/mm²) kunnen bereiken indien er zorg voor wordt gedragen dat het oppervlak niet wordt beschadigd, wordt geconcludeerd dat de structuur slechts een secundaire invloed heeft op de sterkte. Door het opstellen van een zg. sterkteschaal wordt op overzichtelijke wijze aangegeven hoe door combinatie van structuur- en oppervlakinvloeden een bepaald niveau van sterkte wordt bereikt.

2742: J. Goorissen, F. Karstensen en B. Okkerse: Growing single crystals with constant resistivity by floating-crucible technique (Solid state physics in electronics and telecommunications, Proc. int. Conf., Brussel, 2-7 juni 1958, onder redactie van M. Désirant en J. L. Michiels, Vol. 1, blz. 23-27, Academic Press, Londen 1960).

Zie Philips techn. T. **21**, 189-199, 1959 (no. 7).

2743: J. H. Uhlenbroek en J. D. Bijloo: Investigations on nematicides, II. Structure of a second nematicidal principle isolated from Tagetes roots (Rec. Trav. chim. Pays-Bas **78**, 382-390, 1959, no. 5).

Uit de wortels van Tagetes (afrikaantjes) zijn enige stoffen verkregen die zeer werkzaam zijn tegen nematodes (bodemaaltjes). In een vroegere publikatie (no. **2692**) is medegedeeld dat de stoffen polythiënylen zijn, en dat één ervan geïdentificeerd werd als α-terthiënyl. Thans is een tweede stof geïdentificeerd als 5-(3-buteen-1-ynyl)-2,2′-bithiënyl. De instabiliteit van de bedoelde stof bemoeilijkte het onderzoek. De identificatie berustte onder meer op het feit dat bij katalytische hydrogenering 5-butyl-2,2′-bithiënyl werd verkregen, wat werd vastgesteld door het infraroodspectrum ervan te vergelijken met dat van een synthetisch bereid monster. Ook het absorptiespectrum in het infrarood van de te identificeren stof wees erop dat het 5-(3-buteen-1-ynyl)-2,2′-bithiënyl betrof.

2744: H. F. Hameka: Berechnung der magnetischen Eigenschaften des Wasserstoffmoleküls (Z. Naturf. **14a**, 599-602, 1959, no. 7).

Ter berekening van de protonenafschermingsconstante en van de magnetische susceptibiliteit van het waterstofmolecuul worden golffuncties ingevoerd die uit ijkinvariante atoomfuncties zijn samengesteld. De berekeningen worden uitgevoerd voor het geval dat de golffuncties van de grondtoestand met de benadering volgens Wang beschreven worden, en voor het geval dat hiervoor de benadering volgens Rosen gebruikt wordt. De berekening van de protonenafschermingsconstante en van de susceptibiliteit levert in het eerste geval resp. $2{,}631\times10^{-5}$ en $-3{,}920\times10^{-6}$, en in het tweede geval resp. $2{,}732\times10^{-5}$ en $-4{,}045\times10^{-6}$.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!